



*НИИЯФ МГУ,
март 2009 г.,
Москва*

**БНО ИЯИ РАН
В.Н. Гаврин**



Баксанская нейтринная обсерватория и солнечные нейтринные эксперименты

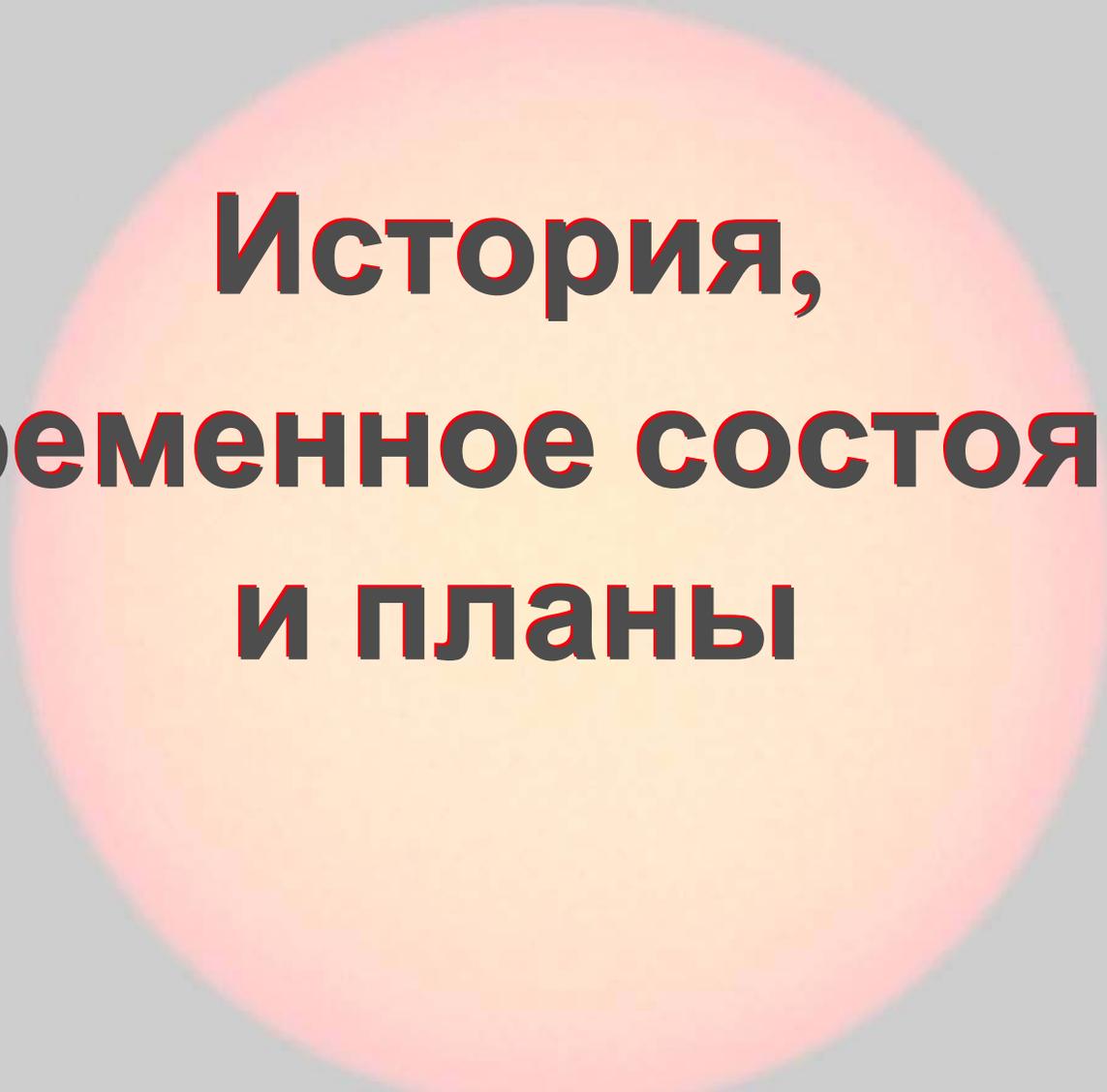
*В.Н. Гаврин
Институт ядерных исследований
РАН*

*НИИЯФ МГУ, март 2009 г.
Москва*



*НИИЯФ МГУ,
март 2009 г.,
Москва*

**БНО ИЯИ РАН
В.Н. Гаврин**



История, современное состояние и планы

(из письма в ЦК КПСС, 1963 г.)

В последние годы развитие физики элементарных частиц привело к возникновению новых перспективных направлений современной науки – физики нейтрино и нейтринной астрофизики. Исследования по физике нейтрино открывают совершенно новые возможности в исследовании структуры элементарных частиц, природы так называемых слабых взаимодействий и других вопросов ядерной физики.

Вследствие того, что нейтрино чрезвычайно слабо взаимодействуют с веществом, проведение исследований в области физики нейтрино и нейтринной астрофизики возможно только в условиях надежного экранирования от фона, создаваемого космическими лучами. Это диктует необходимость сооружения подземной станции, защищенной скальными породами толщиной около 2000 м.

Намечаемые исследования по физике нейтрино и нейтринной астрофизике необходимо проводить в ускоренном темпе, поскольку мы значительно отстаем в этой области от США. До сих пор такие исследования не проводились, в то время как развитие этой области физики в США началось 10 лет назад и особенно форсируется в последние годы. В частности, в ближайшее время в США начнутся эксперименты с использованием нейтрино, образованных космическими лучами в атмосфере Земли, а также нейтрино солнечного происхождения. Предлагаемая Академией наук СССР программа нейтринных исследований позволит за ближайшие 5-7 лет в значительной степени ликвидировать наше отставание в этой области физики.

В связи с изложенным Академия наук СССР просит рассмотреть прилагаемый проект постановления ЦК КПСС и Совета Министров СССР о развитии исследований в области физики нейтрино и нейтринной астрофизики и строительстве с этой целью подземной нейтринной станции.

**Президент Академии наук СССР
академик**

М.В.Келдыш

НИИЯФ МГУ,
март 2009г.,
Москва

БНО ИЯИ РАН
В.Н. Гаврин



М.А. Марков и Б.М. Понтекорво на Международной конференции по физике нейтрино и нейтринной астрофизике. Баксанское ущелье, Чегет, 1977 г.



НИИЯФ МГУ,
март 2009 г.,
Москва

БНО ИЯИ РАН
В.Н. Гаврин



**ПРЕЗИДИУМ АКАДЕМИИ НАУК СССР
ПОСТАНОВЛЕНИЕ
от 19 июля 1963 г., г. Москва**

О развитии экспериментальных исследований в области нейтринной физики

...Имеется основание считать, что использование известных свойств нейтрино низких энергий позволит путем исследования нейтринной активности Солнца получить прямые экспериментальные данные о термоядерных процессах в его недрах. Постоянная служба нейтринной активности Солнца позволит выяснить вопросы, связанные с характером деятельности солнечного ядра, а в дальнейшем, возможно, производить долговременное прогнозирование активности Солнца и определяемых ею условий в космическом пространстве.

...Изучение нейтринных процессов может привести не только к познанию явлений, происходящих в недрах Солнца и других звезд, не только к получению важнейшей информации, несомой к нам из глубинных областей космического пространства, но и к познанию природы так называемого слабого взаимодействия, реализуемого в таких микрообластях пространства, в которых уже может сказаться ее структурность.

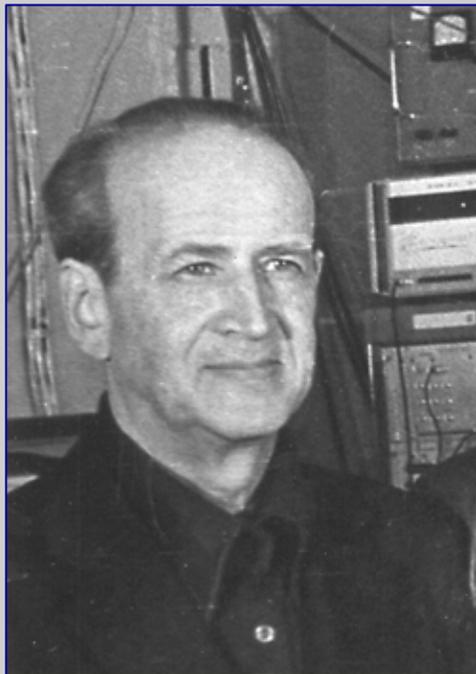
Президент Академии наук СССР
академик

М.В.Келдыш

Баксан начался в 1963 г., когда

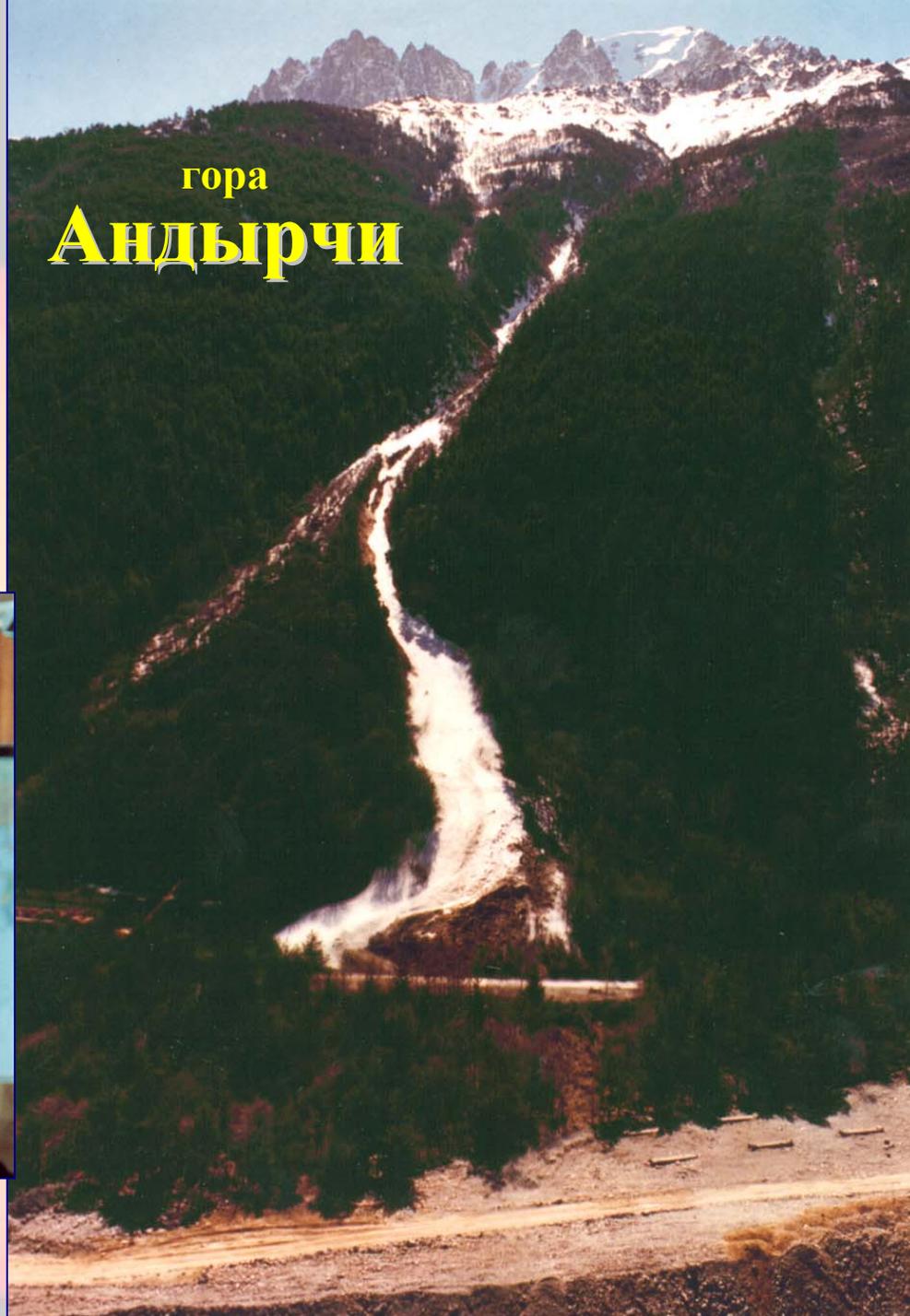
Георгий Зацепин и

Александр Чудаков



начали набирать молодых людей, в основном выпускников физфака МГУ, для развития программы подземных исследований, которые включают: космические лучи, атмосферные и солнечные нейтрино, нейтрино от суперновой.

Г.Т. Зацепин выбрал гору Андырчи в Баксанском ущелье на Северном Кавказе. Это был самый экономичный вариант из всех возможных для создания подземной лаборатории.





★ Москва
Троицк

Баксан

Байкал

НИИЯФ МГУ
март 2009
Москва

БНО ИЯИ РАН
В.Н. Гаврин

Баксанская нейтринная обсерватория

Гора Андырчи

EAS array
"Andyrchy"



"Karpet-2"
EAS array



Tunnel
entrance



Neutrino
village



Баксанская нейтринная обсерватория

Гора Андырчи

- 1,7 – Низкофоновая лаборатория
- 2 - Баксанский подземный сцинтилляционный телескоп
- 3 - Лазерный интерферометр
- 4 - Акустическая гравитационная антенна
- 5 - Геофизическая лаборатория
- 6 - Галлий-германиевый нейтринный телескоп (SAGE)

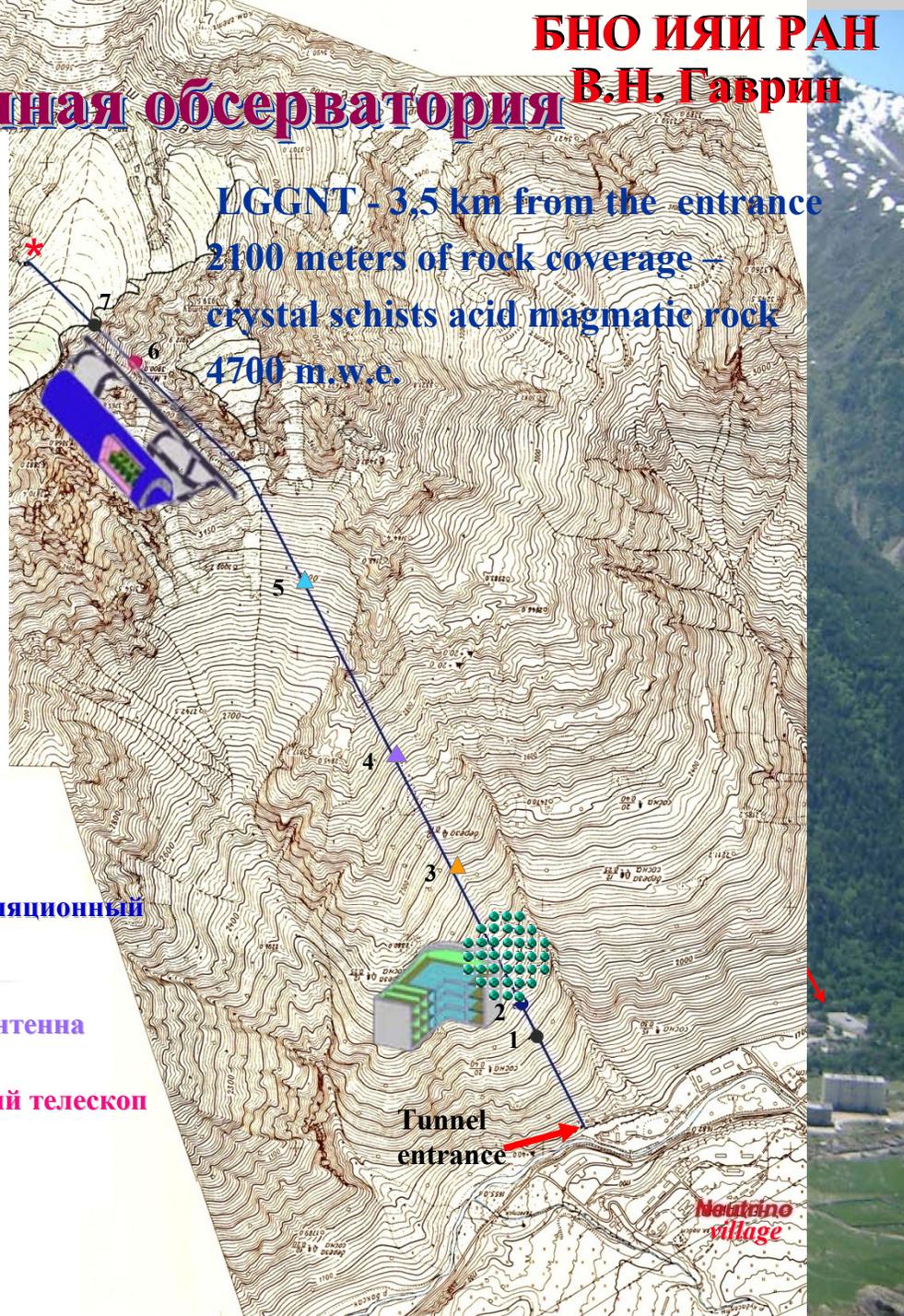
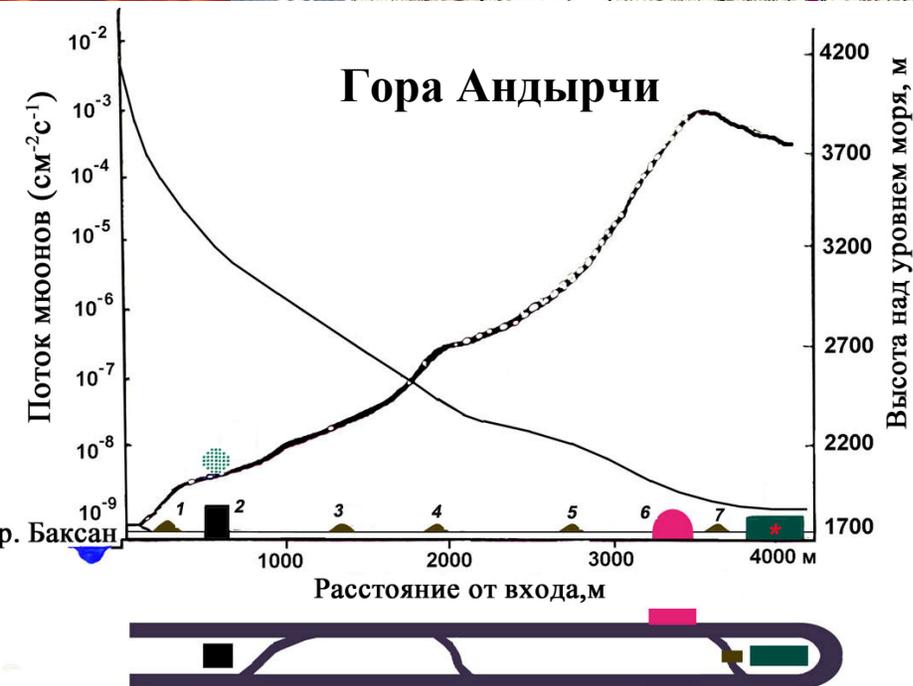
- * - Для будущих проектов
-  - Установка "Андырчи"



Tunnel
entrance

Neutrino
village

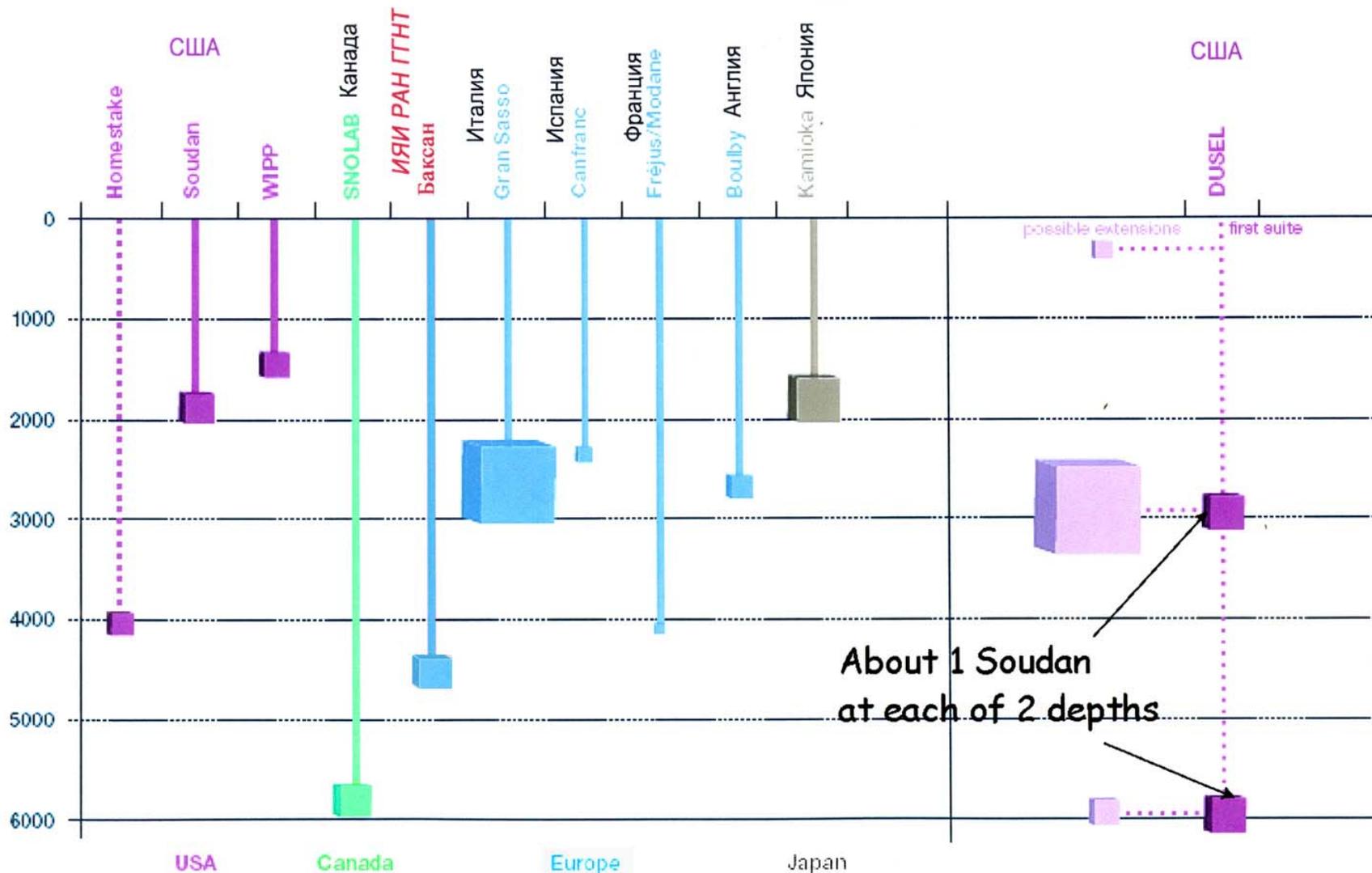
Баксанская нейтринная обсерватория



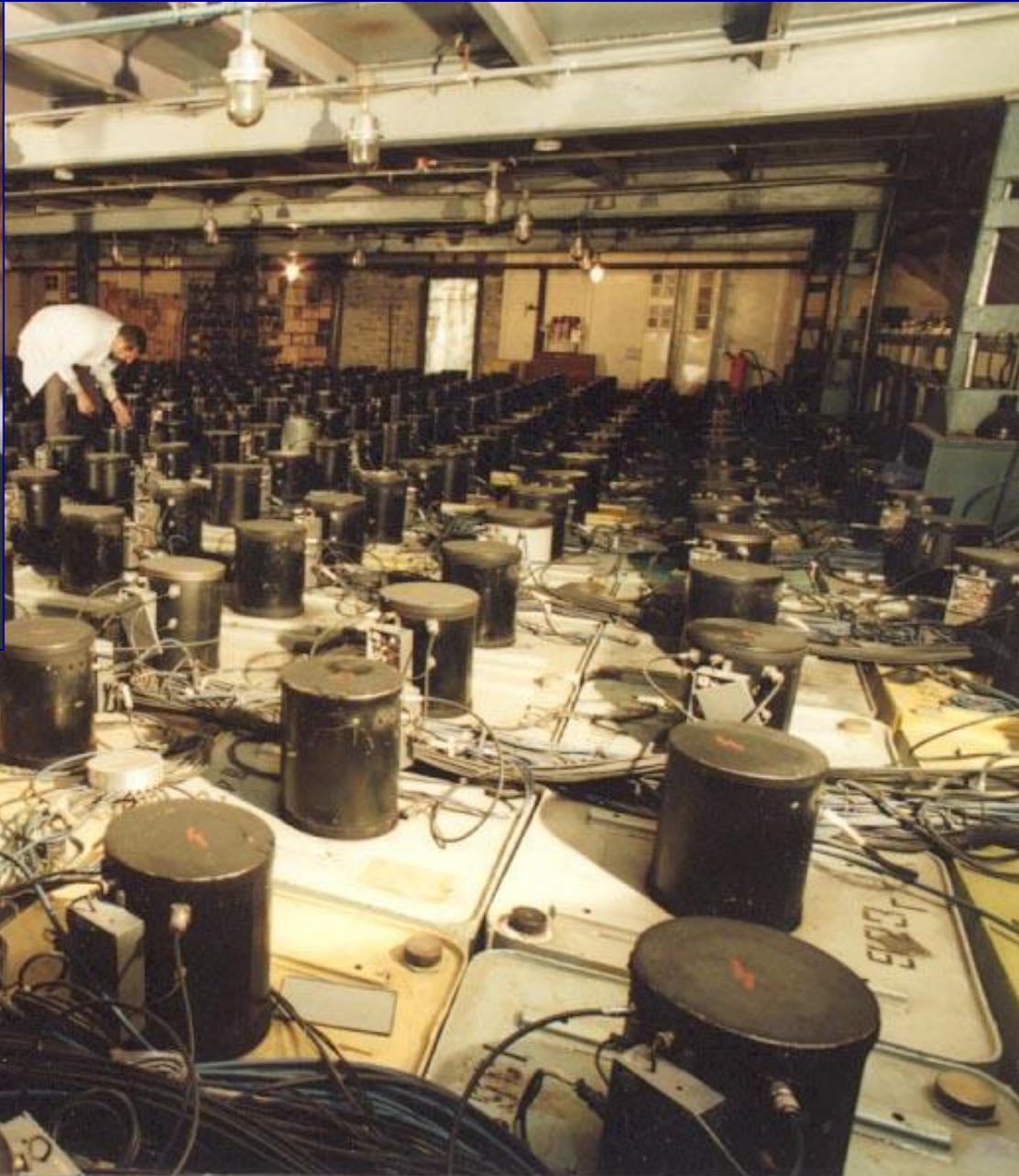
- 1,7 – Низкофоновая лаборатория
- 2 - Баксанский подземный сцинтилляционный телескоп
- 3 - Лазерный интерферометр
- 4 - Акустическая гравитационная антенна
- 5 - Геофизическая лаборатория
- 6 - Галлий-германиевый нейтринный телескоп (SAGE)
- * - Для будущих проектов
- - Установка "Андырчи"

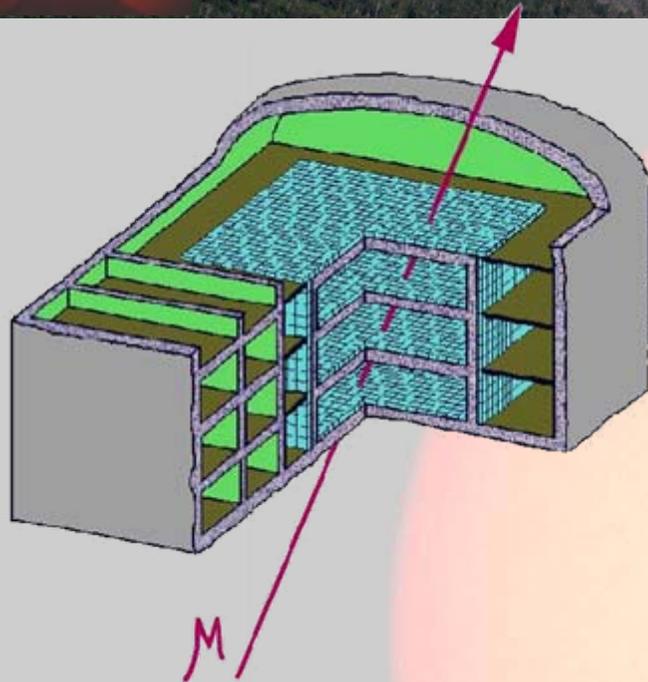


Science Underground



Baksan Underground Scintillator Telescope





- ✓ Глубина: 850 гг/см²
- ✓ Размер: 17×17×11м
- ✓ Кол-во детекторов: 3150
- ✓ Размер бака: 70×70×30см
- ✓ Темп счета БПСТ: 17 с⁻¹
- ✓ $N_{\text{верх}}/N_{\text{вниз}}$: 10⁻⁷

Основные задачи:

❖ Нейтринная физика

- Измерение потока мюонов от атмосферных нейтрино из нижней полусферы и исследование взаимодействий мюонов и нейтрино с ядрами.
- Нейтринные всплески от гравитационного коллапса

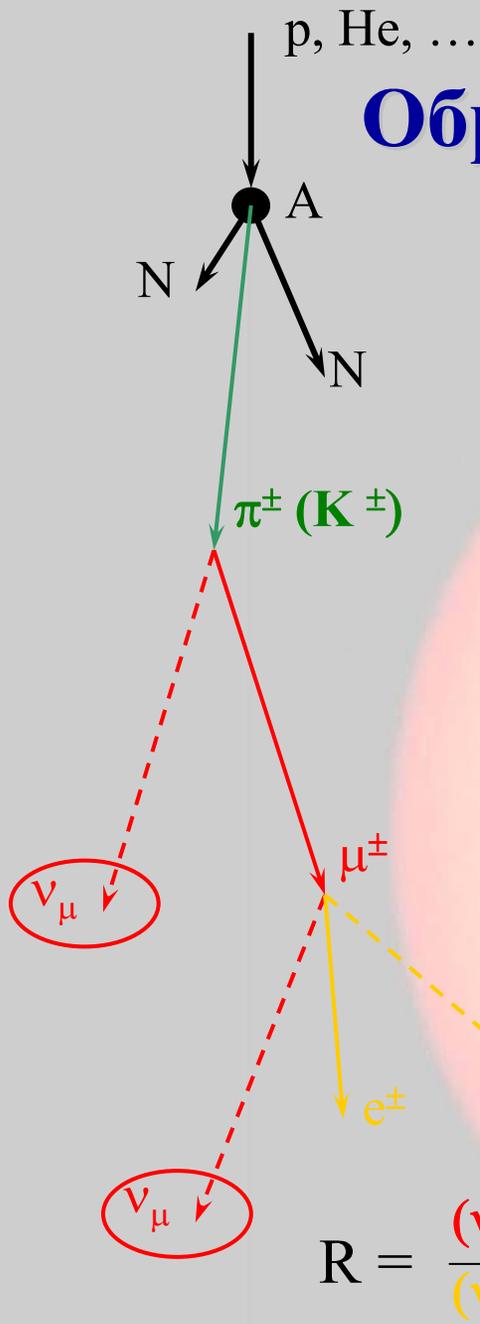
❖ Физика космических лучей

- Изучение спектра первичных космических лучей
- Изучение химического состава первичного космического излучения
- Измерение анизотропии космических лучей

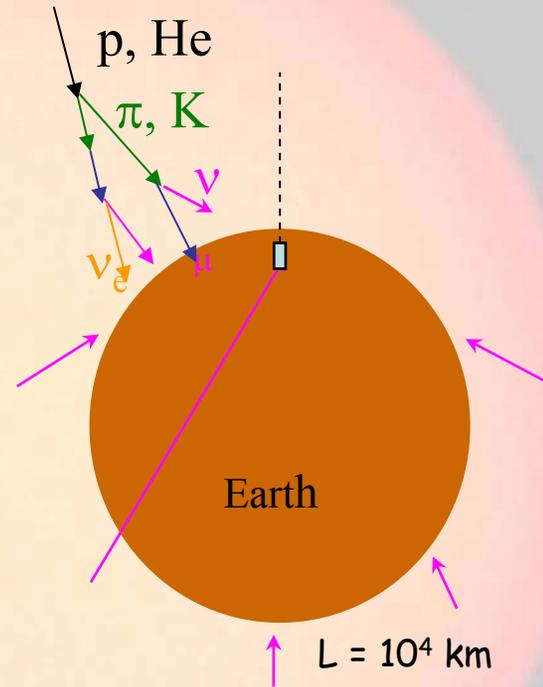
❖ Экзотика

- Поиск магнитного монополя
- Регистрация всплесков высокоэнергичных мюонов ($E > 200$ ГэВ) в течение мощных солнечных вспышек

Образование атмосферных нейтрино



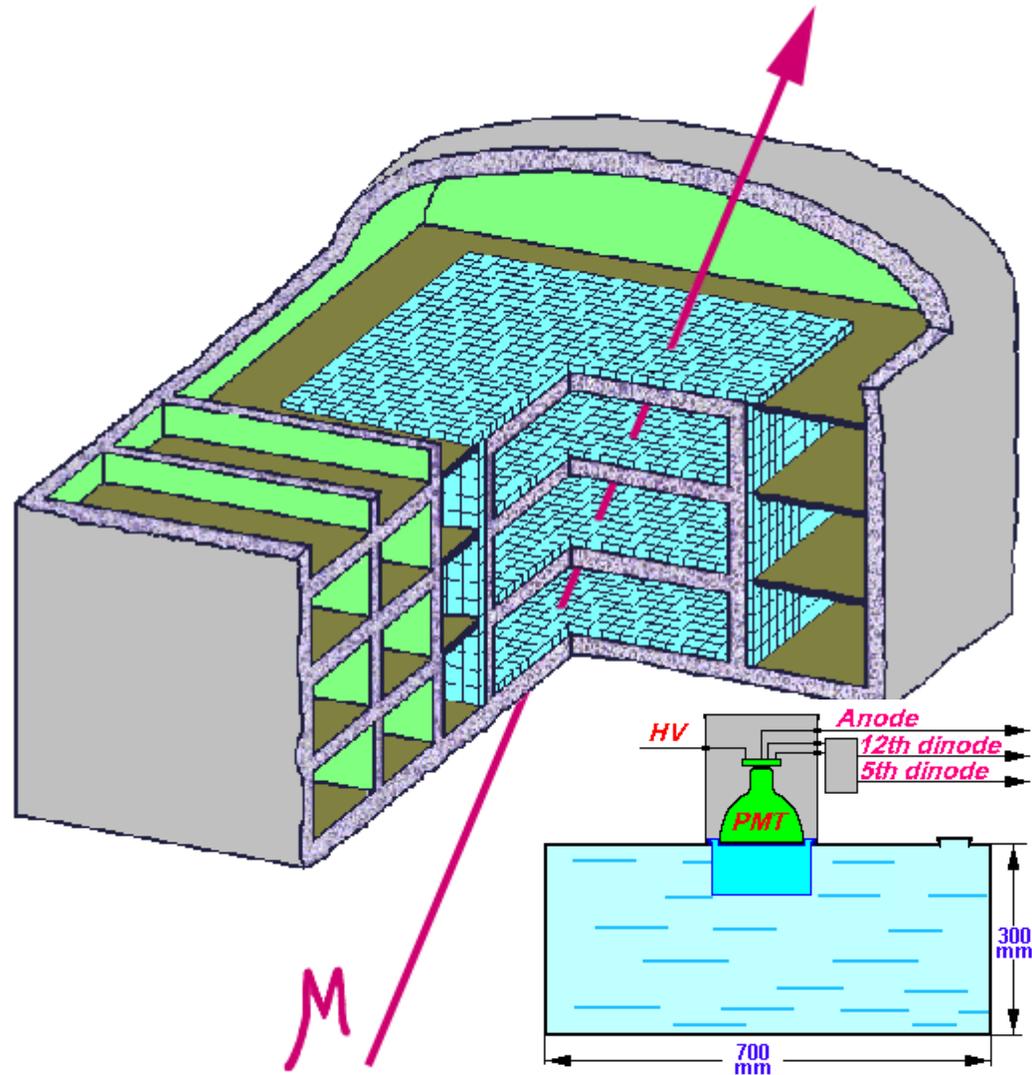
$$R = \frac{(\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu)}{(\nu_e + \bar{\nu}_e)} = 2$$

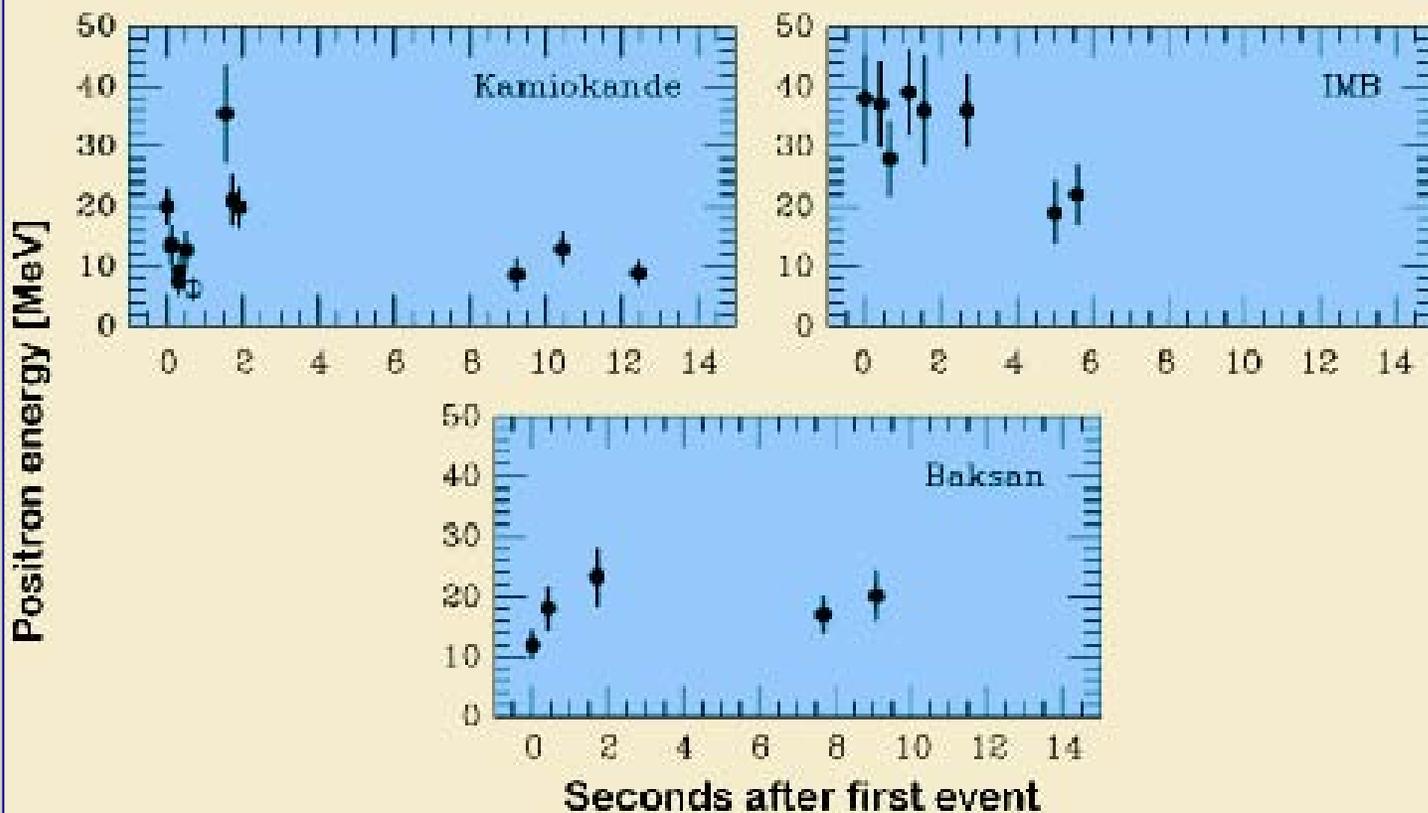


Baksan Underground Scintillator Telescope

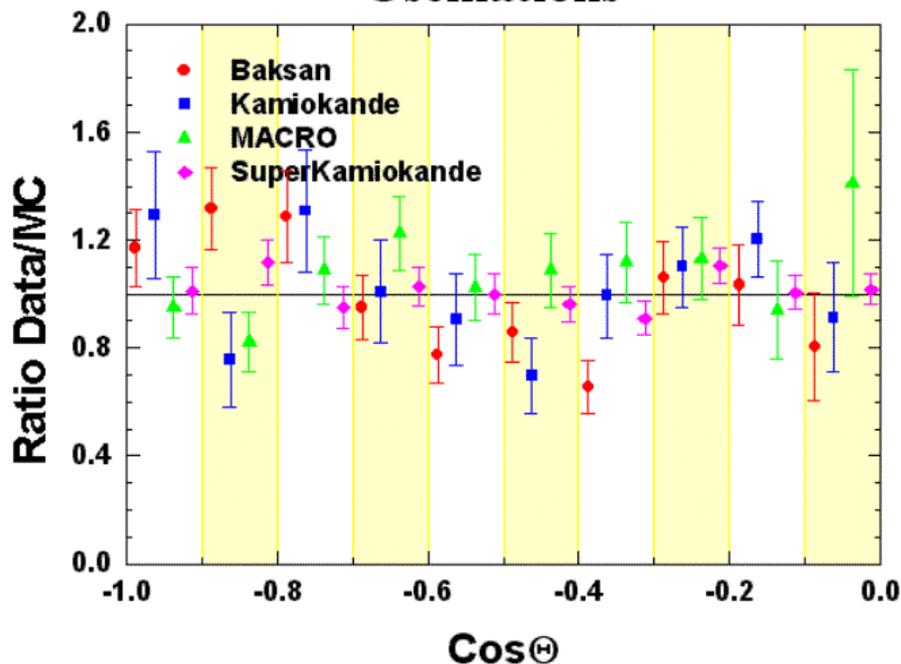
It was really a large progress because on this installation the idea of the time of flight technique to observe upgoing neutrinos was first realized. Success was achieved and the first measurements of neutrino induced upgoing muons were made using this telescope. The first upgoing muon from neutrino was registered 31 years ago on 13.12.1978, and it came from Chili.

BUST and other installations observed neutrinos from supernovae 1987A. BUST has now the largest live time of search of neutrinos from burst of supernovae - almost 20 years.

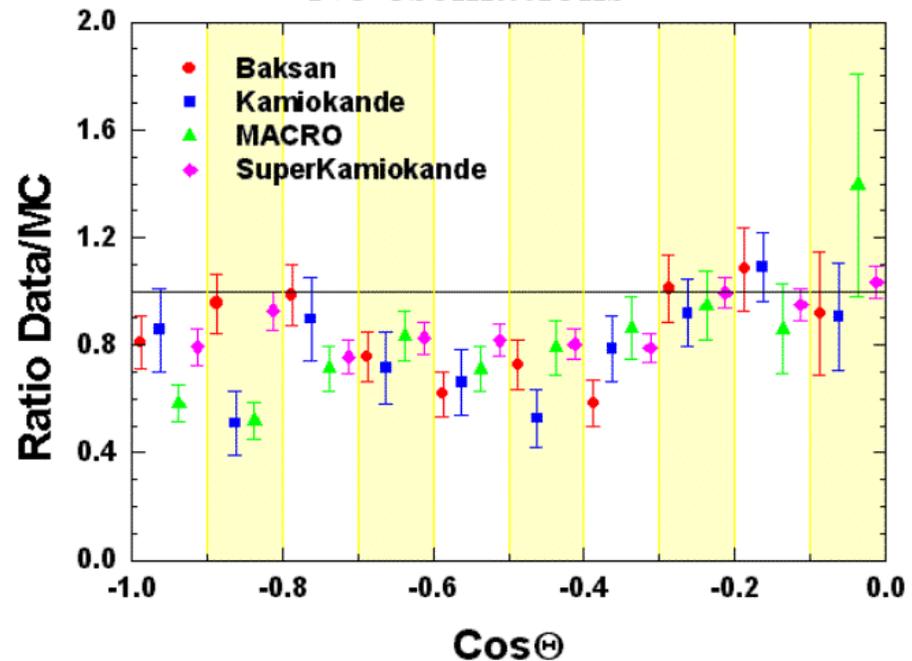




Oscillations



No oscillations



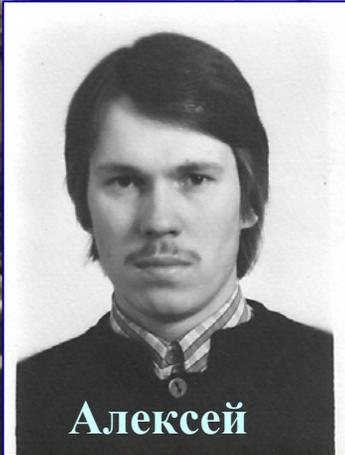
Ludmila Volkova

ПСТ подтвердил аномалию углового распределения идущего снизу потока мюонов, происходящую из-за осцилляций.

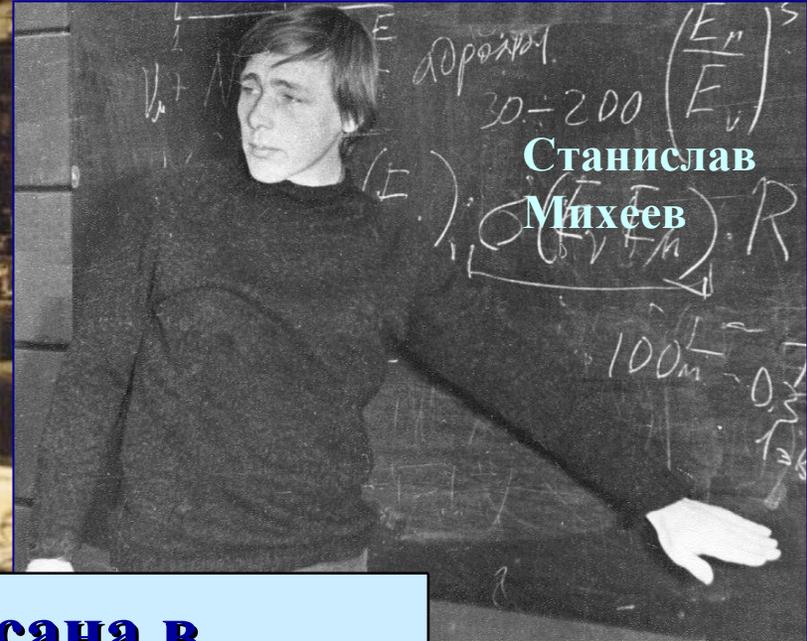
Людмила Волкова признана одним из лучших экспертов в этой области. Ею проведены расчеты потоков мюонов космических лучей и атмосферных нейтрино, их свойства рассмотрены в широком диапазоне энергии с учетом всех доступных данных из экспериментов с ускорителями и космических лучей.

Baksan Underground Scintillator Telescope

MSW-эффект



Алексей
Смирнов



Станислав
Михеев

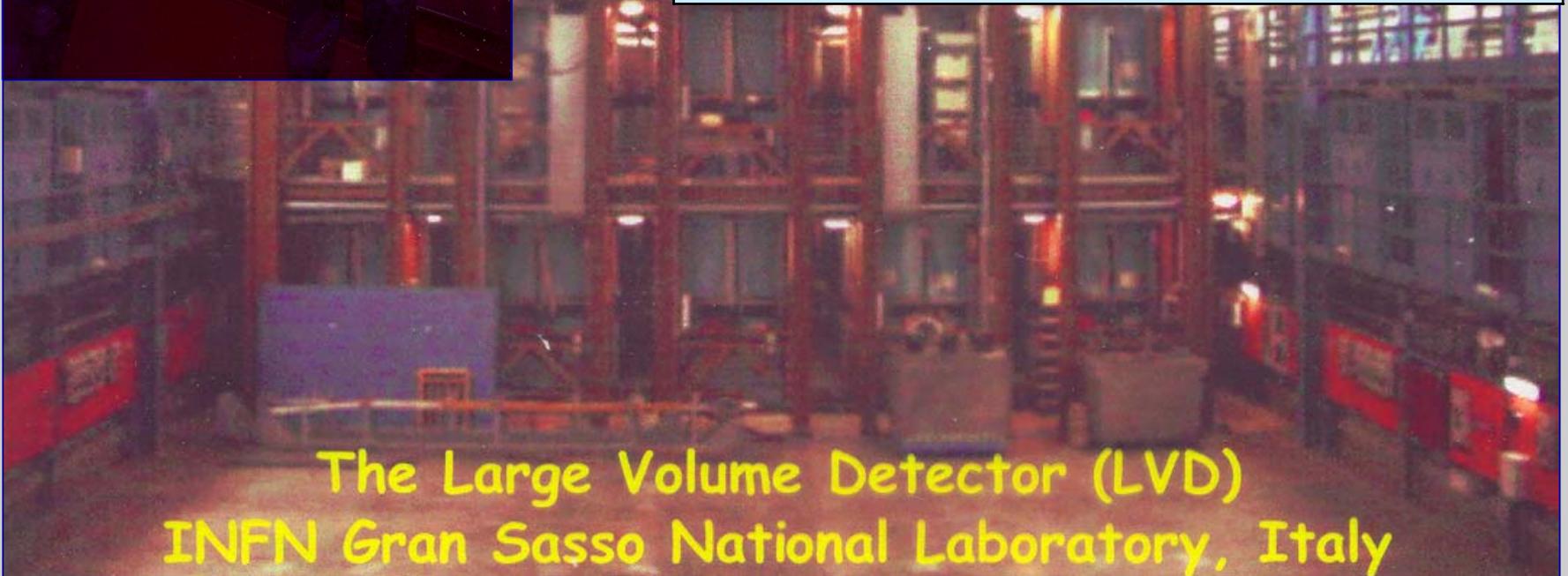
Это значительный вклад Баксана в физику солнечных нейтрино.

Придет время, когда мировое научное сообщество оценит по достоинству истинную значимость их вклада.



**Ольга Ряжская руководит с
российской стороны работой
известной Итало-Российской
коллаборации LVD.**

**Член-корреспондент
Российской Академии наук**



**The Large Volume Detector (LVD)
INFN Gran Sasso National Laboratory, Italy**

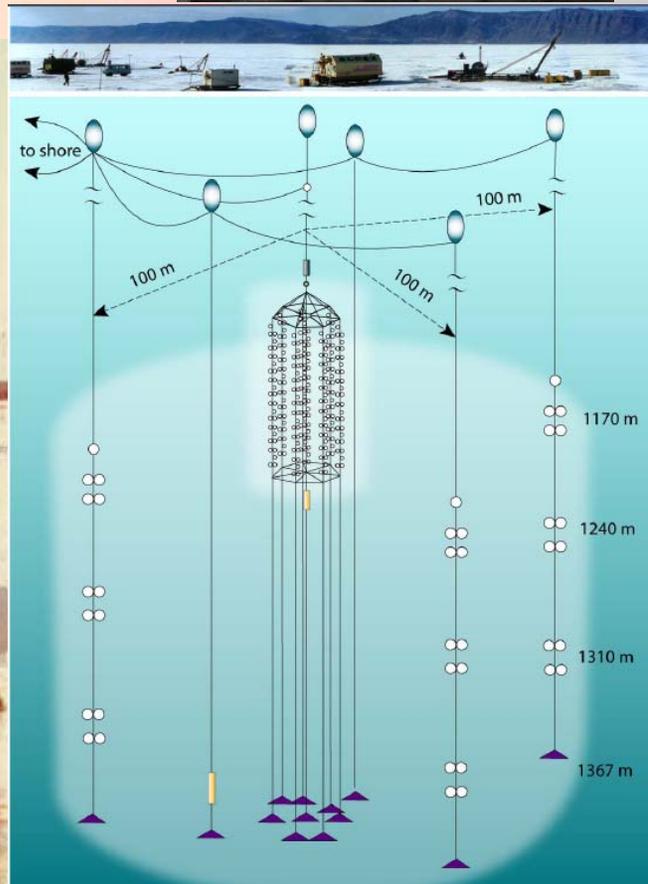
Григорий Домогацкий



Григорий Домогацкий также из Баксанской команды, кто начинал работать над проблемой солнечных нейтрино. Его работы по расчету сечений взаимодействия и рассмотрение различных способов детектирования солнечных нейтрино оказали сильное влияние на нашу деятельность того времени. С Григорий Домогацкий руководитель Байкальской нейтринной обсерватории, руководитель лабораторий нейтринной астрофизики высоких энергий. Член Президиума Российской академии наук.



**Григорий Домогацкий и
Георгий Зацепин в
Байкальской нейтринной
обсерватории**





НИИЯФ МГУ,
март 2009 г.,
Москва

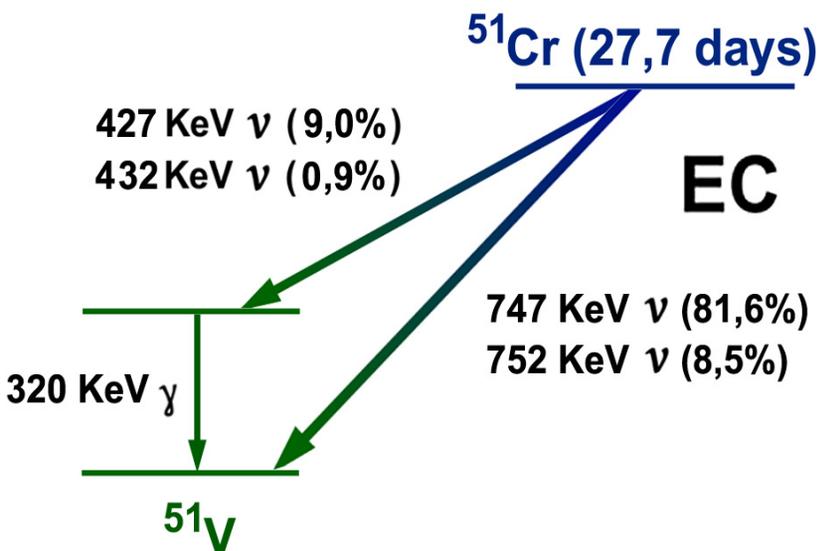


БНО ИЯИ РАН
В.Н. Гаврин

Вадим Кузьмин



Decay Scheme of Cr-51



Вадим Кузьмин - известный в мире теоретик, член-корреспондент Российской Академии наук. В 1965 г., будучи аспирантом Г.Т. Зацепина, он предложил радиохимический галлиевый детектор и искусственный ${}^{51}\text{Cr}$ источник нейтрино для его калибровки.

Александр Поманский
(в центре) со своей группой
низкофоновых исследований:
(слева направо)

Александр Клименко
Сергей Осетров
Валерий Кузьминов
Анатолий Смольников
Сергей Васильев



Александр Поманский

значительную часть своей жизни посвятил Баксанской нейтринной обсерватории. Он был большим патриотом нейтринной Обсерватории и был первым, кто начал вести научную работу на Баксане и создал низкофоновую лабораторию по исследованию редких процессов. Эта группа сейчас хорошо известна своими работами по поиску двойного бета распада и темной материи.

Мы благодарны Александру Поманскому за его огромные усилия в создании Обсерватории.

Источники нейтрино

Методы регистрации



Детекторы ШАЛ
Радио (■)
Акустика (?)

Подземные
Подводные

Черенковские

Черенковские

Радиохимические

Сцинтилляционные

Нет

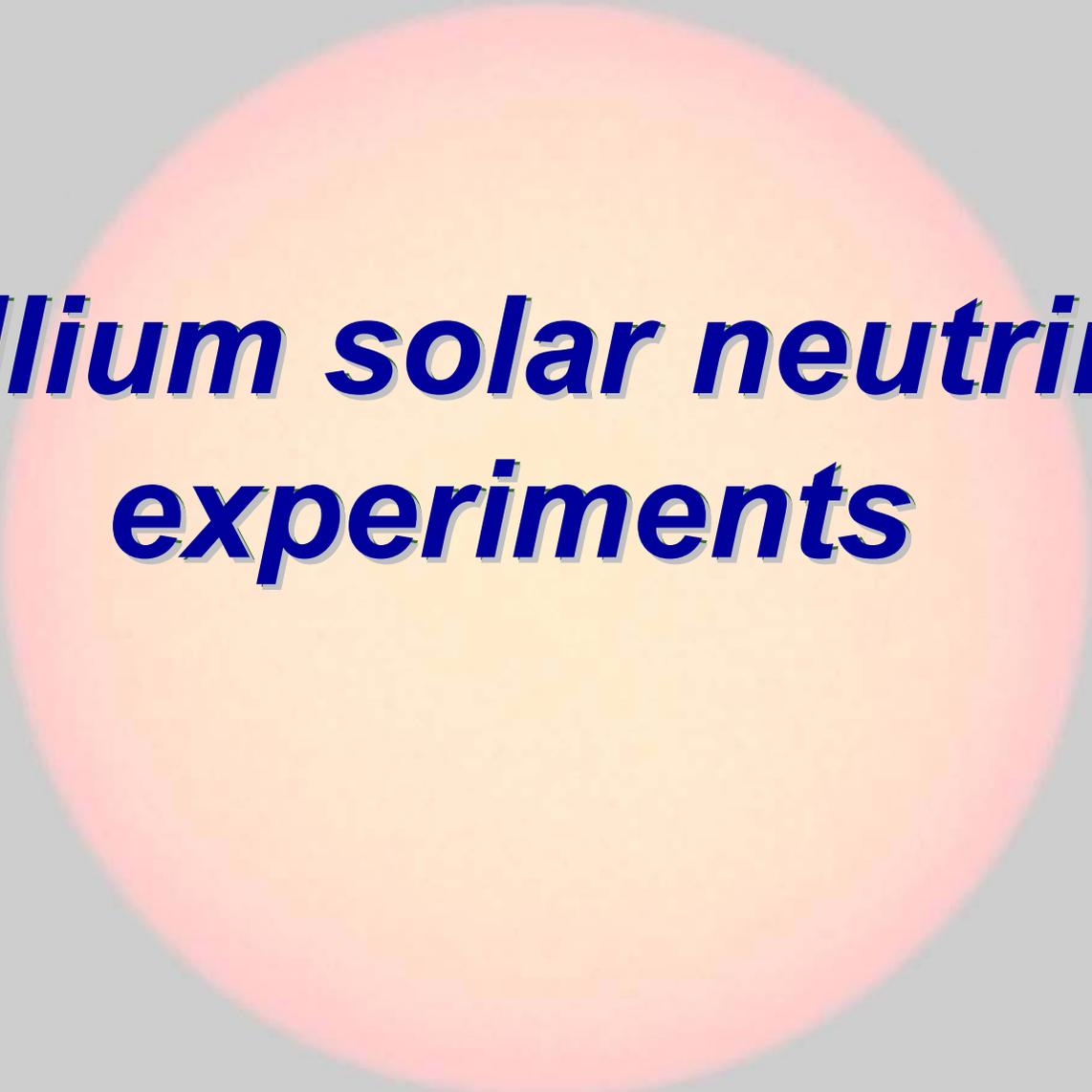
Dubna

May, 21-25

INR RAS

V.N. Gavrin

V.A. Matveev



***Gallium solar neutrino
experiments***

Историческая справка

1930 В. Паули постулировал существование нейтральной частицы малой массы как “выход из сложившейся ситуации” (“*a desperate way out*”).

1934 Э. Ферми назвал частицу Паули “нейтрино”. Представление о нейтрино в теории β -распада, которую годом позже развил Ферми, оказалось настолько плодотворным, что нейтрино уверенно было внесено в число элементарных частиц задолго до того, как оно было открыто.

Паули: “*I have invented something that cannot be detected*”

(Очевидно, что он недооценил изобретательность экспериментаторов.)

1946 Понтекорво показал, что “observation of neutrinos is not out of question” и предложил для детектирования нейтрино использовать “inverse beta process” : $\bar{\nu} + (A, Z) \rightarrow e^{-} + (A, Z+1)$

Он предложил в качестве источников $\bar{\nu}$ Солнце и реактор. (“The neutrinos emitted by the sun, however, are not very energetic”).

Среди возможных мишеней ^{37}Cl рассматривался как наиболее многообещающий: $^{37}\text{Cl} + \bar{\nu} \rightarrow ^{37}\text{Ar} + e^{-}$

Понтекорво предложил использовать миниатюрный низкофоновый счетчик высокого усиления.

Эти две его идеи стали основой всех радиохимических экспериментов.

В точности они будут осуществлены Р. Девисом.

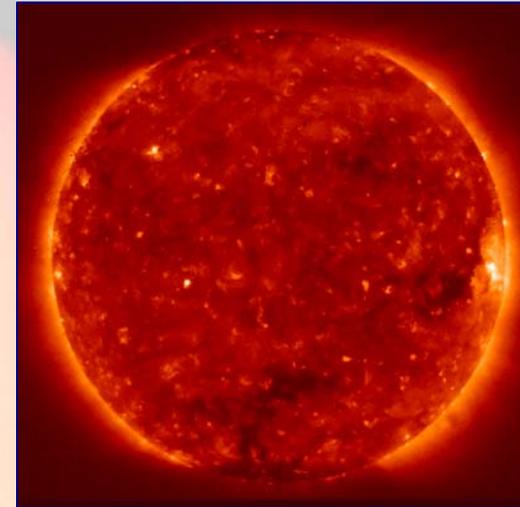
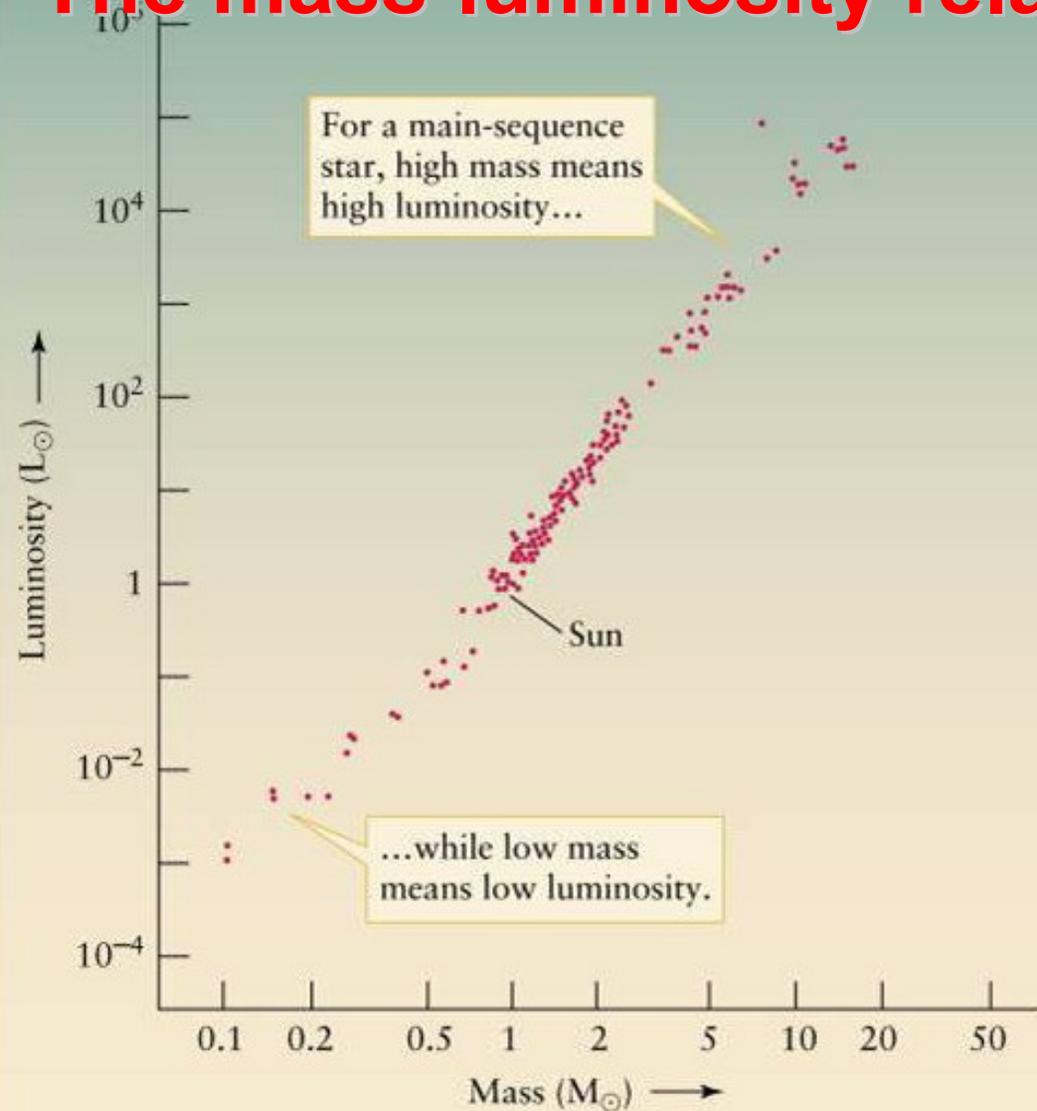
1956 Ф. Райнес и К. Коуэн регистрируют $\bar{\nu}$ от Savannah River реактора $p(\bar{\nu}, e^{+})n$.

1960's Рэй Девис строит Хлорный детектор для измерения скорости образования в реакции $^{37}\text{Cl}(\bar{\nu}, e^{-})^{37}\text{Ar}$

Джон Бакалл создает ССМ и предсказание потоков $\bar{\nu}$ “...to see into the interior of a star and thus verify directly the hypothesis of nuclear energy generation in stars...”

1965 В. Кузьмин предложил использовать реакцию $^{71}\text{Ga}(\bar{\nu}, e^{-})^{71}\text{Ge}$ для детектора солнечных $\bar{\nu}$ и искусственный ^{51}Cr источник нейтрино для его калибровки.

The mass-luminosity relationship for stars

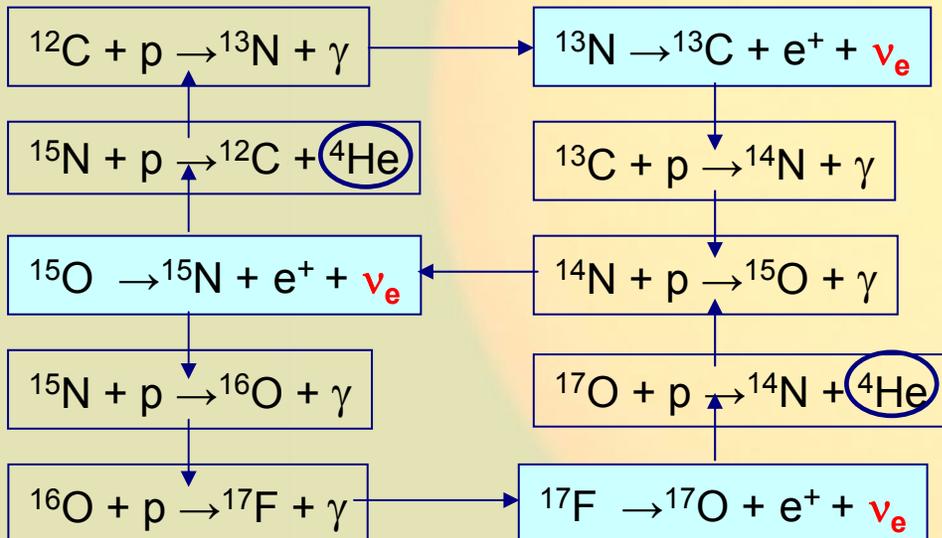


The Sun is a main-sequence star at stage of stable hydrogen burning

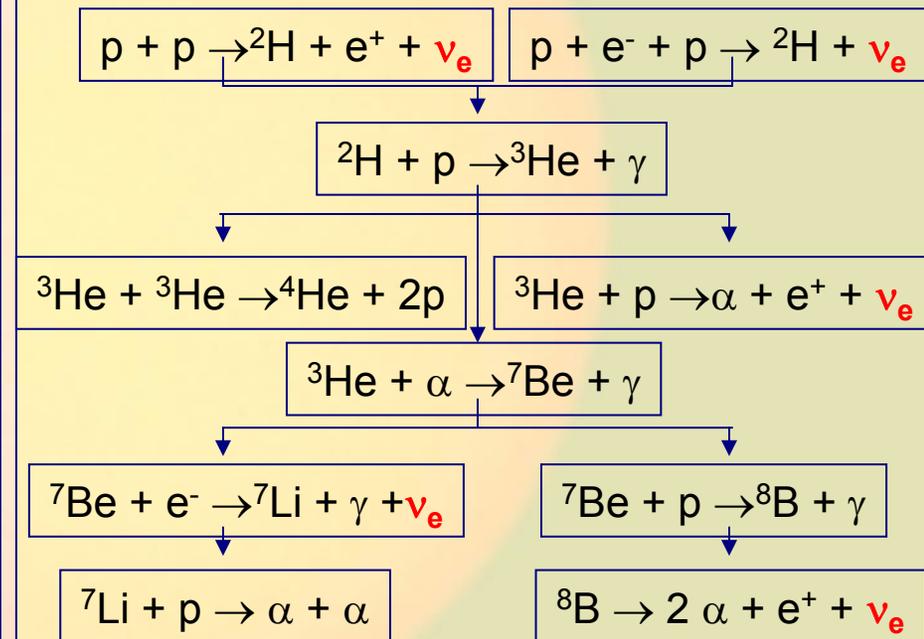
The Sun's Source of Energy



CNO cycle



pp chain



von Weizacker, H. Bethe, Crichtfield, 1938.

Время прохождения
из центра до поверхности:

Тепловая энергия –
~ 10 млн. лет

Фотоны –
~ 10 тыс. лет

Энергетический
поток

Нейтрино –
8 минут
до Земли

$6 \cdot 10^{10} \text{ (см}^2 \cdot \text{сек)}^{-1}$

Температура



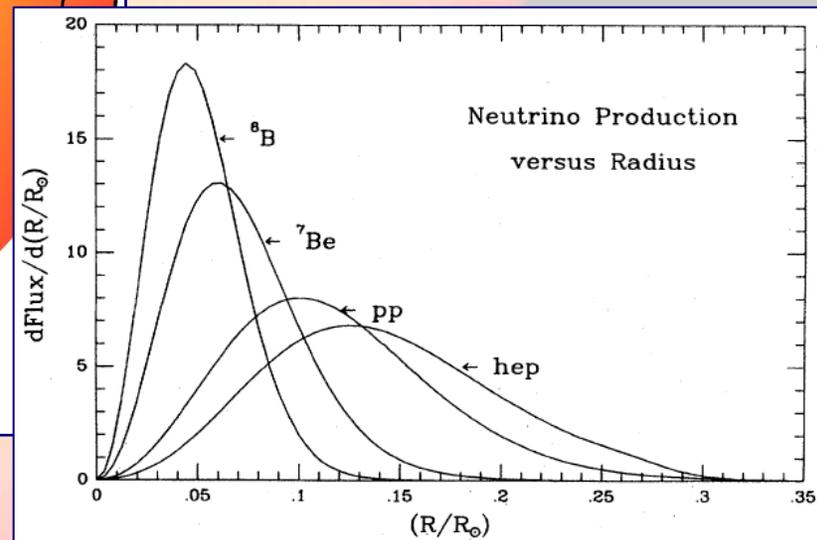
Генерация энергии

$$R_{\odot} = 7 \cdot 10^8 \text{ м}$$

$$M_{\odot} = 2 \cdot 10^{33} \text{ г/см}^3$$

Плотность ядра (1/4 R_☉)

$$\rho = 20\text{-}158 \text{ г/см}^3$$



Как проверить теорию?

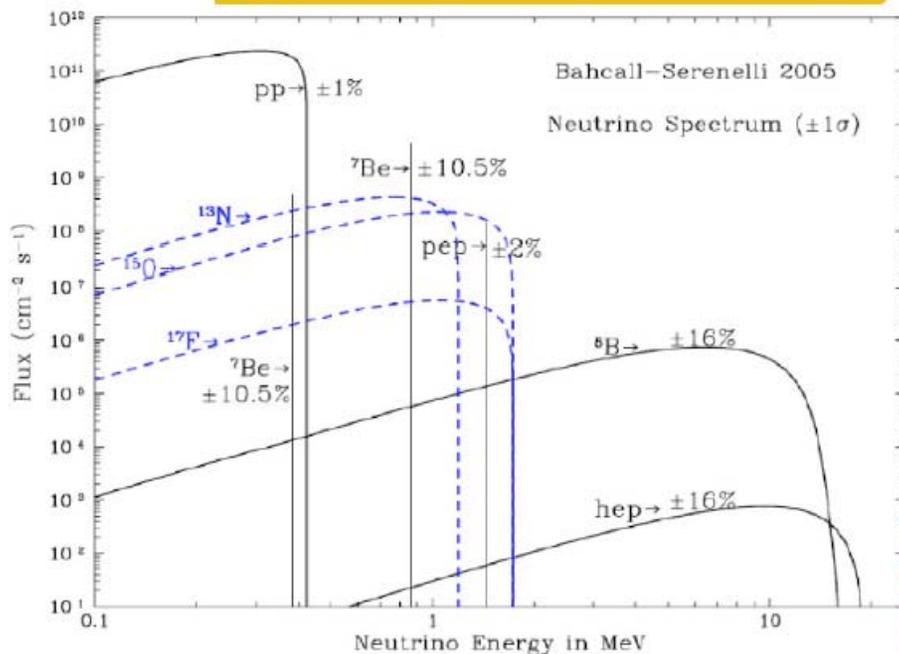
**Neutrinos are the spy
of nuclear fusion in the Sun**

LowNu

Water C

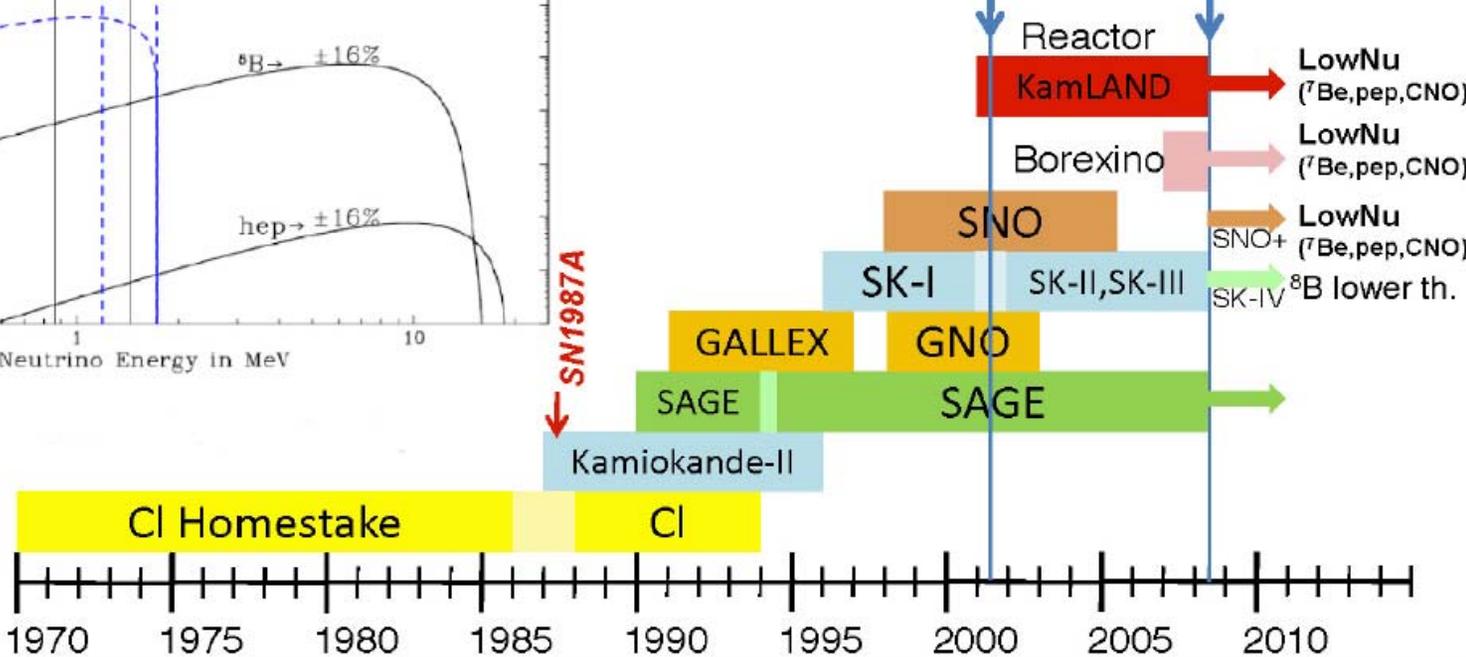
Cl

Ga



Discovery of
Solar ν Oscillation

Today



Homestake Radiochemical experiment

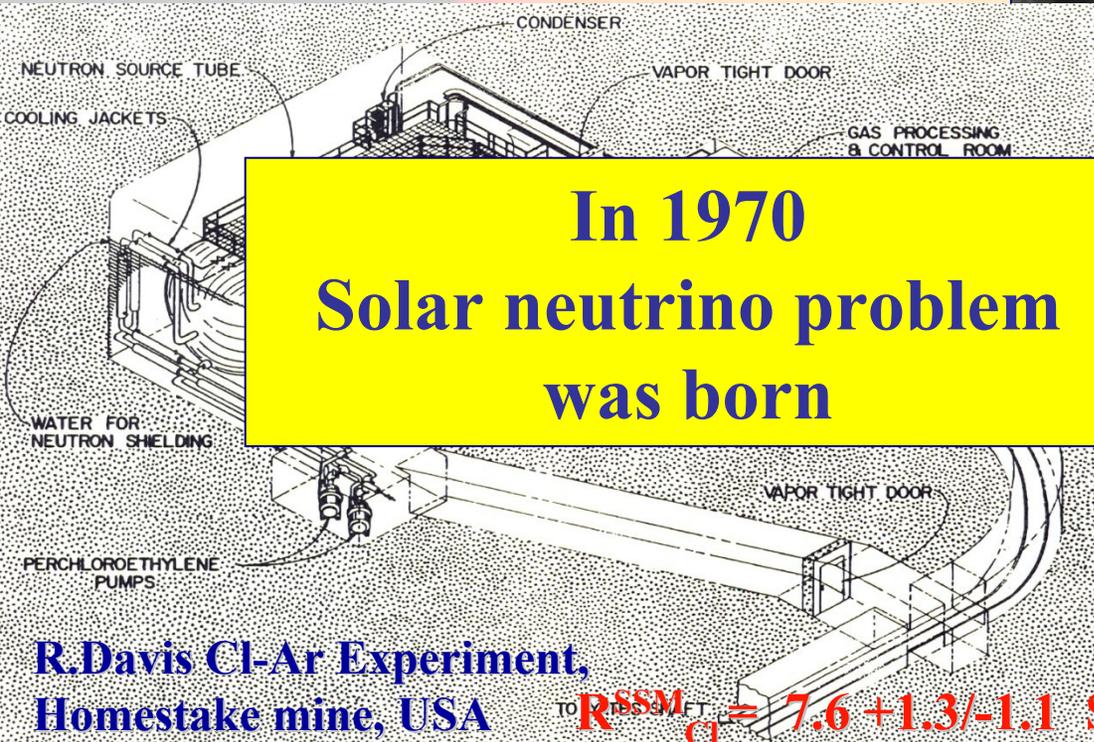
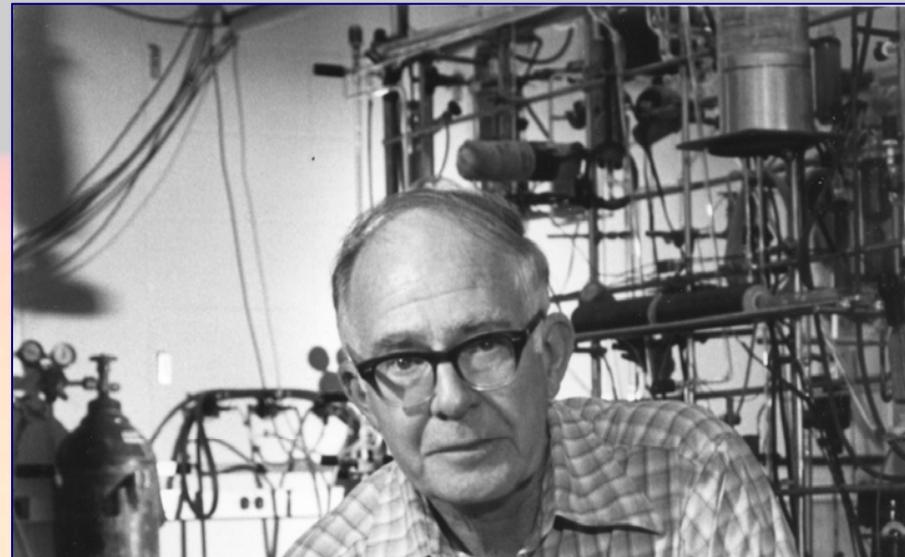
$$\nu_e + {}^{37}\text{Cl} \rightarrow$$

Homestake G
 1478 m deep,
 steel tank, 6.1
 615 tons of te
 (C_2Cl_4), 2.16 x
 energy thresh
 $E_{\text{th}}^{\text{Cl}} = 0.814$
 data taking: 1



Montana, USA)
 2 day^{-1}
 (6×10^5 liters)
 (tons)

$$R_{\text{Cl}}^{\text{exp}} = 2.56 \pm 0.16 \pm 0.16 \text{ SNU} = 2.56 \pm 0.23 \text{ SNU}$$



**In 1970
 Solar neutrino problem
 was born**

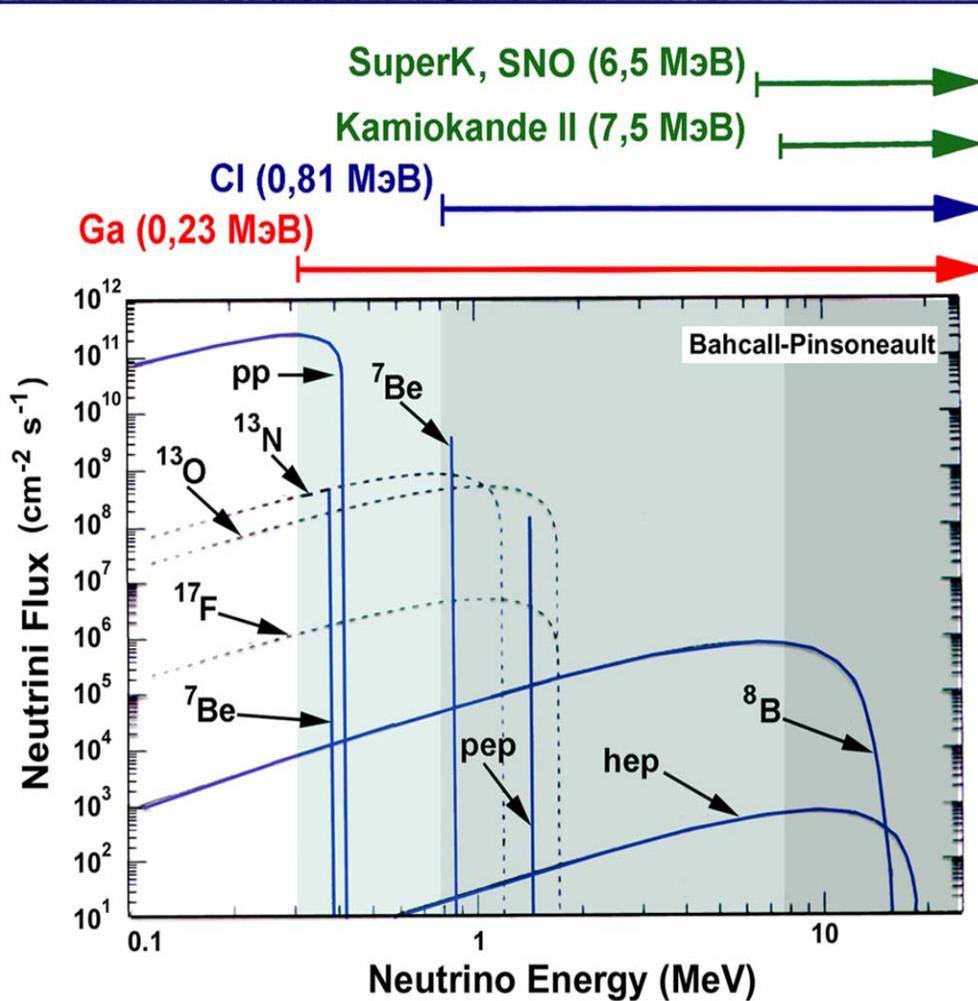
**R. Davis Cl-Ar Experiment,
 Homestake mine, USA**

$$R_{\text{Cl}}^{\text{SSM}} = 7.6 + 1.3 / - 1.1 \text{ SNU}$$

Потоки нейтрино и скорости событий в хлорном и галлиевых солнечных нейтринных экспериментах, предсказанные Бакалом, Pinsonneault и Basu.

Реакция	Сокр.	Поток (см-2сек-1)	Cl (SNU*)	BP2000 [9] Ga (SNU*)
$pp \rightarrow de^+ \nu$	pp	$5.95 (1.00 +0.01/-0.01) \times 10^{10}$	---	69.7
$pe-p \rightarrow d\nu$	per	$1.40 (1.00 + 0.015/-0.015) \times 10^8$	0.22	2.8
${}^3\text{He} p \rightarrow {}^4\text{He} e^+ \nu$	hep	9.3×10^3	0.04	0.1
${}^7\text{Be} e^- \rightarrow {}^7\text{Li} \nu + (\gamma)$	${}^7\text{Be}$	$4.77 (1.00+0.10/-0.10)$	1.15	34.2
${}^8\text{B} \rightarrow {}^8\text{Be}^* e^+ \nu$	${}^8\text{B}$	$5.05 (1.00+0.20/-0.16) \times 10^6$	5.76	12.1
${}^{13}\text{N} \rightarrow {}^{13}\text{C} e^+ \nu$	${}^{13}\text{N}$	$5.48 (1.00+0.21/-0.17) \times 10^8$	0.09	3.4
${}^{15}\text{O} \rightarrow {}^{15}\text{N} e^+ \nu$	${}^{15}\text{O}$	$4.80 (1.00+0.25/-0.19) \times 10^8$	0.33	5.5
${}^{17}\text{F} \rightarrow {}^{17}\text{O} e^+ \nu$	${}^{17}\text{F}$	$5.63 (1.00+0.25/-0.25) \times 10^6$	0.0	0.1
Всего			7.6+1.3/-1.1	128+9 /-7

*1 SNU (Солнечная Нейтринная Единица) = 10^{-36} захватов на атом в секунду



- **1 SNU** = 1 interaction/sec in a target that contains 10^{36} atoms of the neutrino absorbing isotope.

LOW THRESHOLD:

233 keV

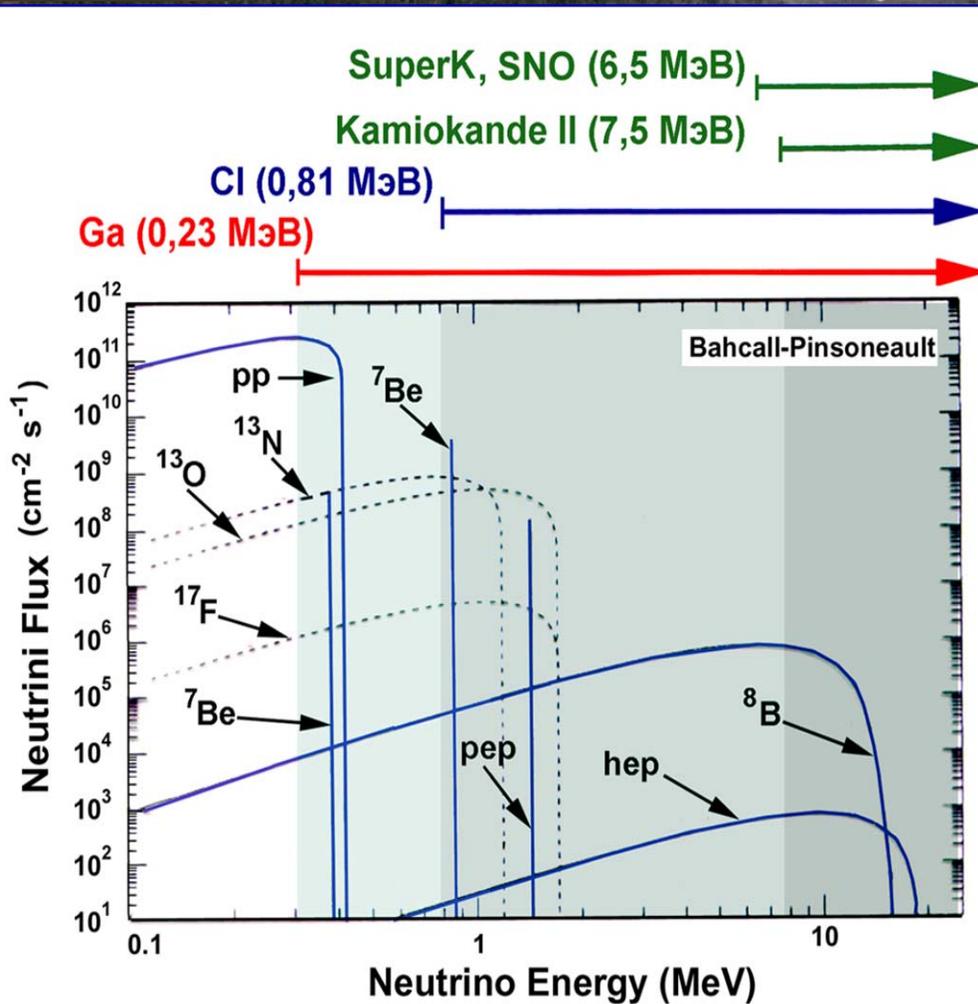
SENSITIVE TO
DOMINANT p-p NEUTRINOS

SSM PREDICTIONS:

BAHCALL-PINSONNEAULT:
128 +9 / -7 SNU (1σ)

p-p NEUTRINOS CONTRIBUTE
70 SNU (54%) OF THE RATE

IF ONE ASSUMES ONLY THAT THE
SUN IS INTHERMAL EQUILIBRIUM,
THEN THE MINIMUM RATE IN A
GALLIUM EXPERIMENT IS 79 SNU.



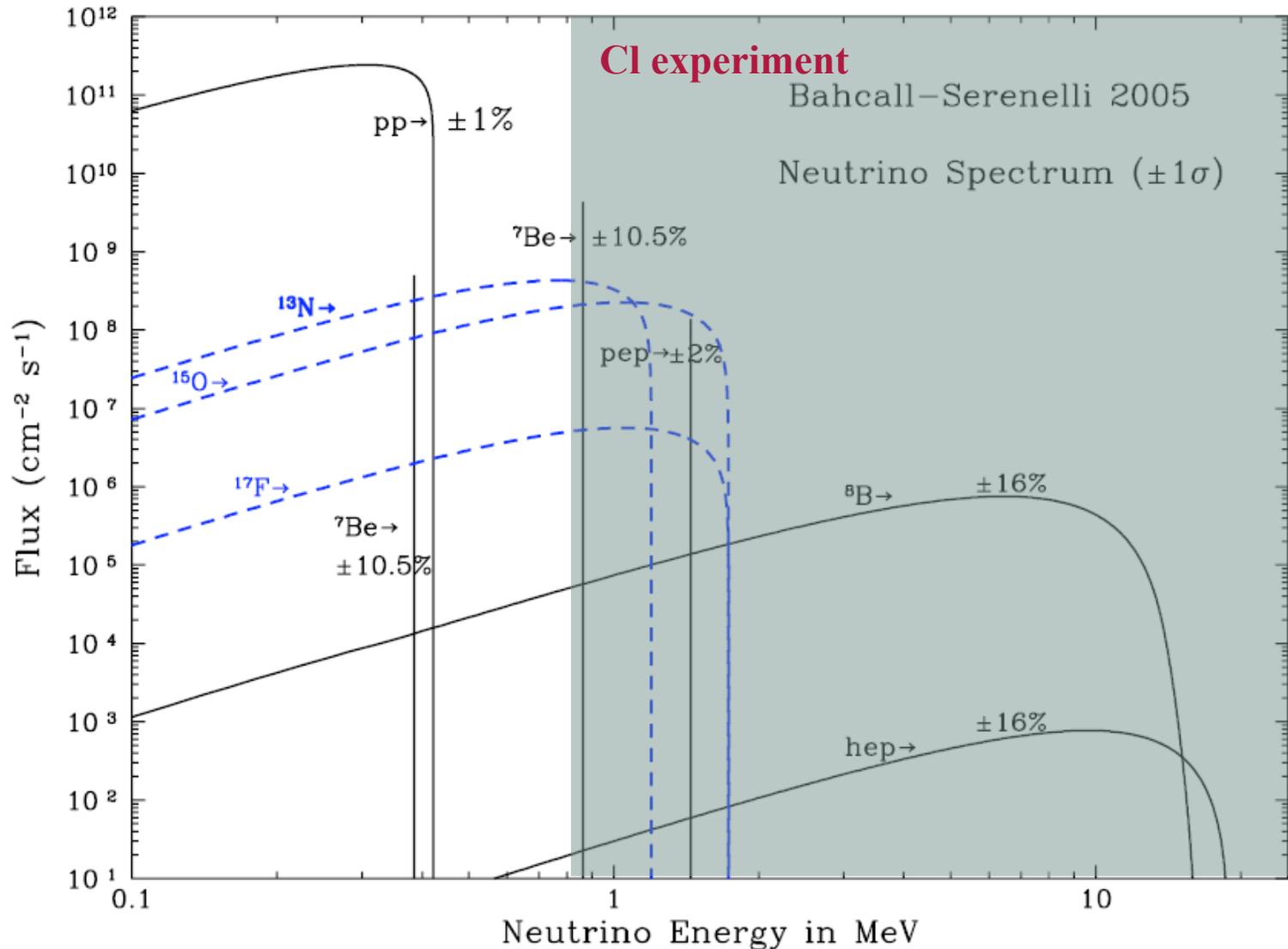
- 1 SNU = 1 interaction/sec in a target that contains 10^{36} atoms of the neutrino absorbing isotope.

About 45 years ago, when the gallium to detect low-energy neutrino was proposed, the gallium experiment was not practical because the world production of gallium was only about 100 kg per year, whereas a mass of approximately 50 tons was required to produce 1-2 atoms per day of product isotope ^{71}Ge .

After first results of Davis chlorine experiment the interest to low-energy part of solar neutrino flux has arisen.

Chlorine - $2,55 \pm 0,25$
Capture Rate SNU

Solar Neutrinos Spectrum

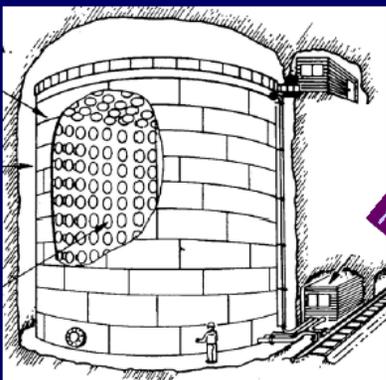


From p decay to solar neutrino

1986 – 1995



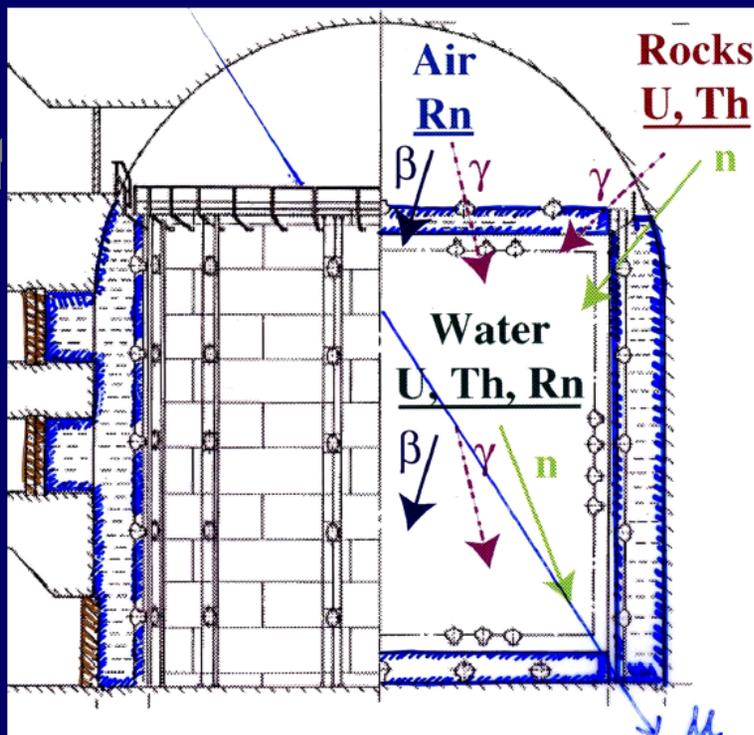
Kamiokande-I



upgrade :

- hermetic, live anticounter
- water purification system
- multi-hit time and charge measurements

Kamiokande-II Detector



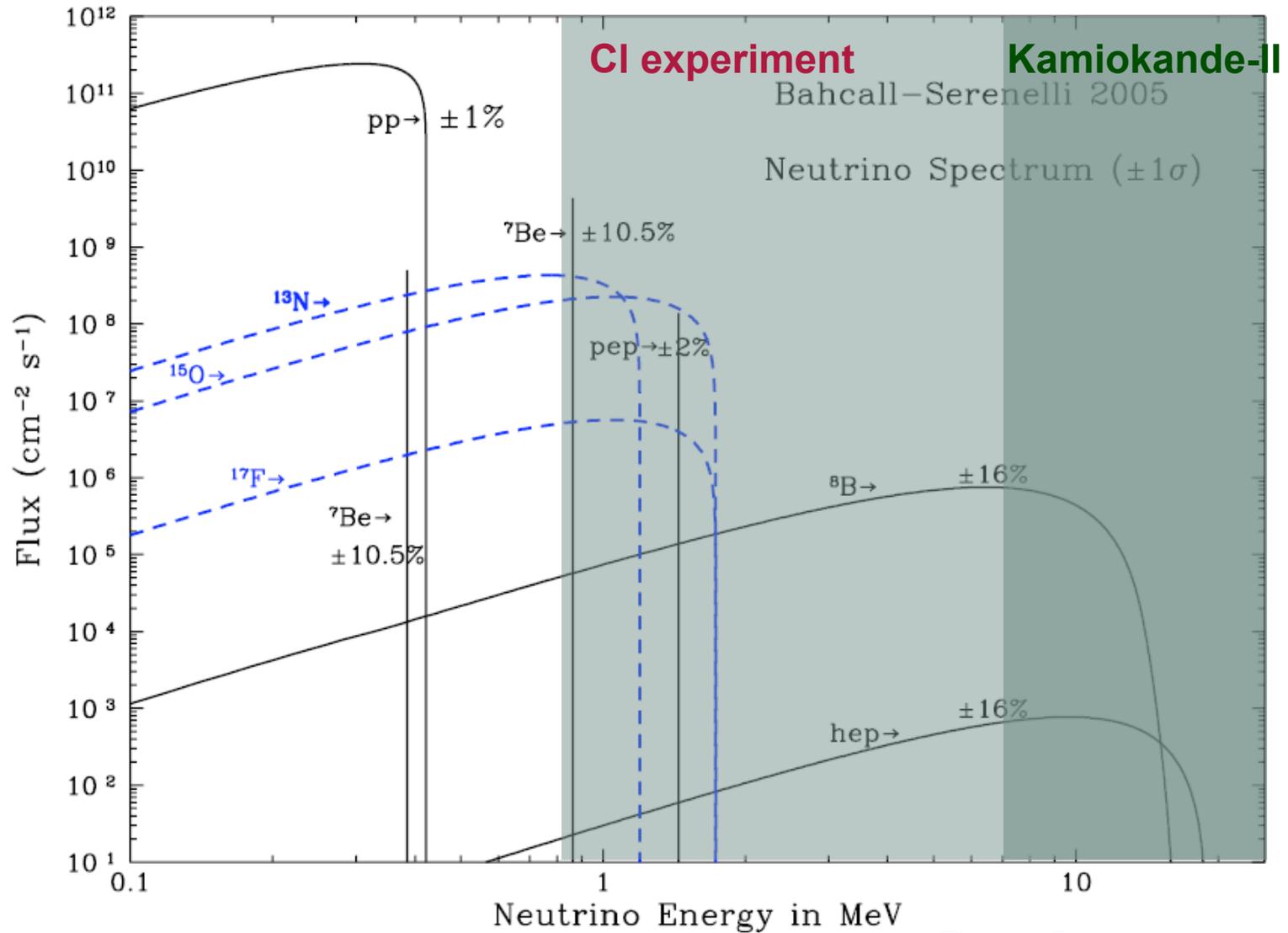
The Kamiokande II detector:
3,000 tons of water, viewed
by 948 PMTs.

The final data sample in the
fiducial volume of 680 tons
with energy above 7 MeV
(7.5 MeV) and less than 20
MeV consists of 6368
events.

Direction to the Sun.

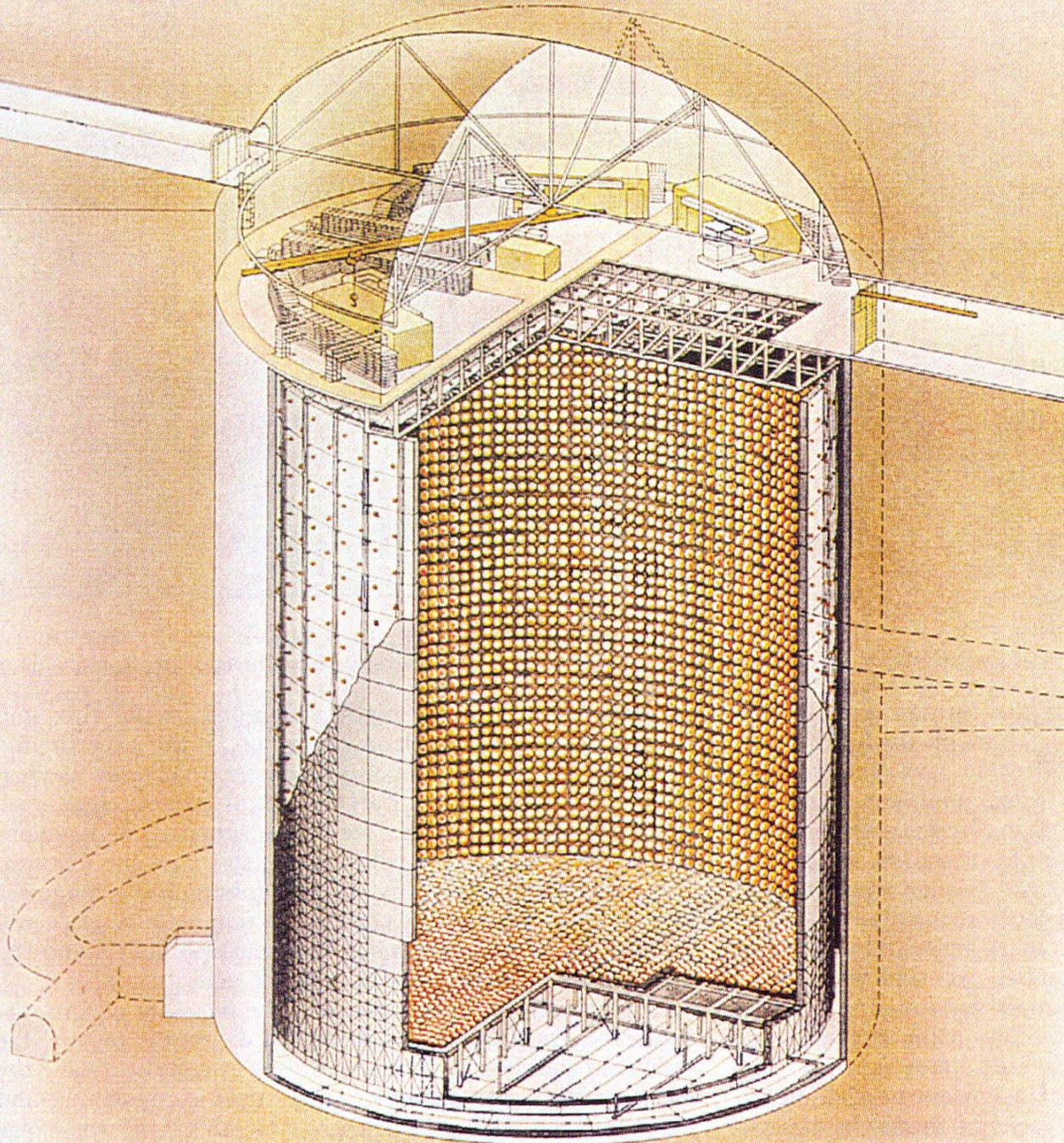
The number of solar neutrino
events is 390^{+35}_{-33} , where
as expected is 785 for the

Solar Neutrinos Spectrum



$$R_{K_{II}} = \frac{\Phi_{measured}}{\Phi_{predicted}} = 0.48 \pm 0.08$$

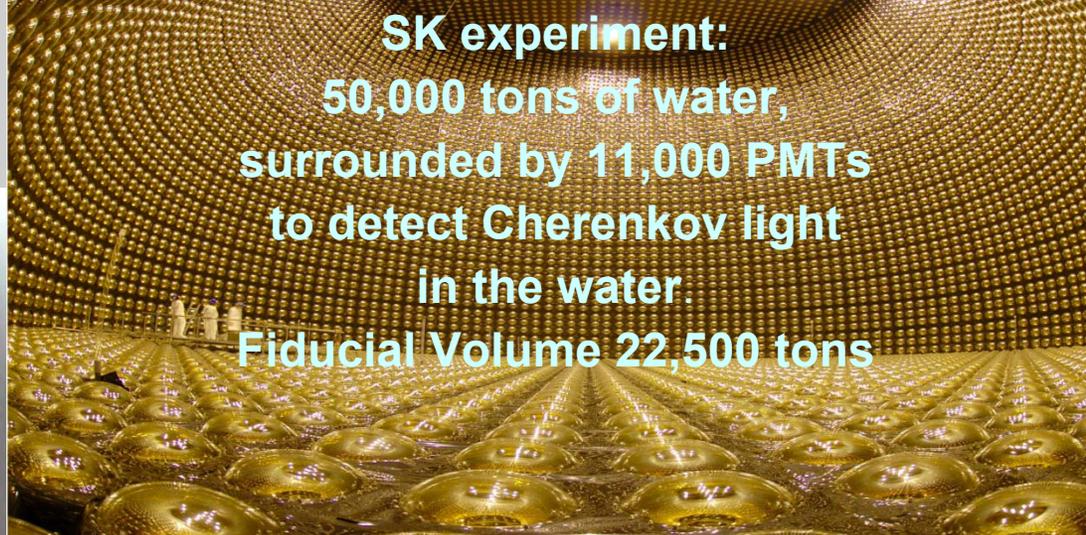
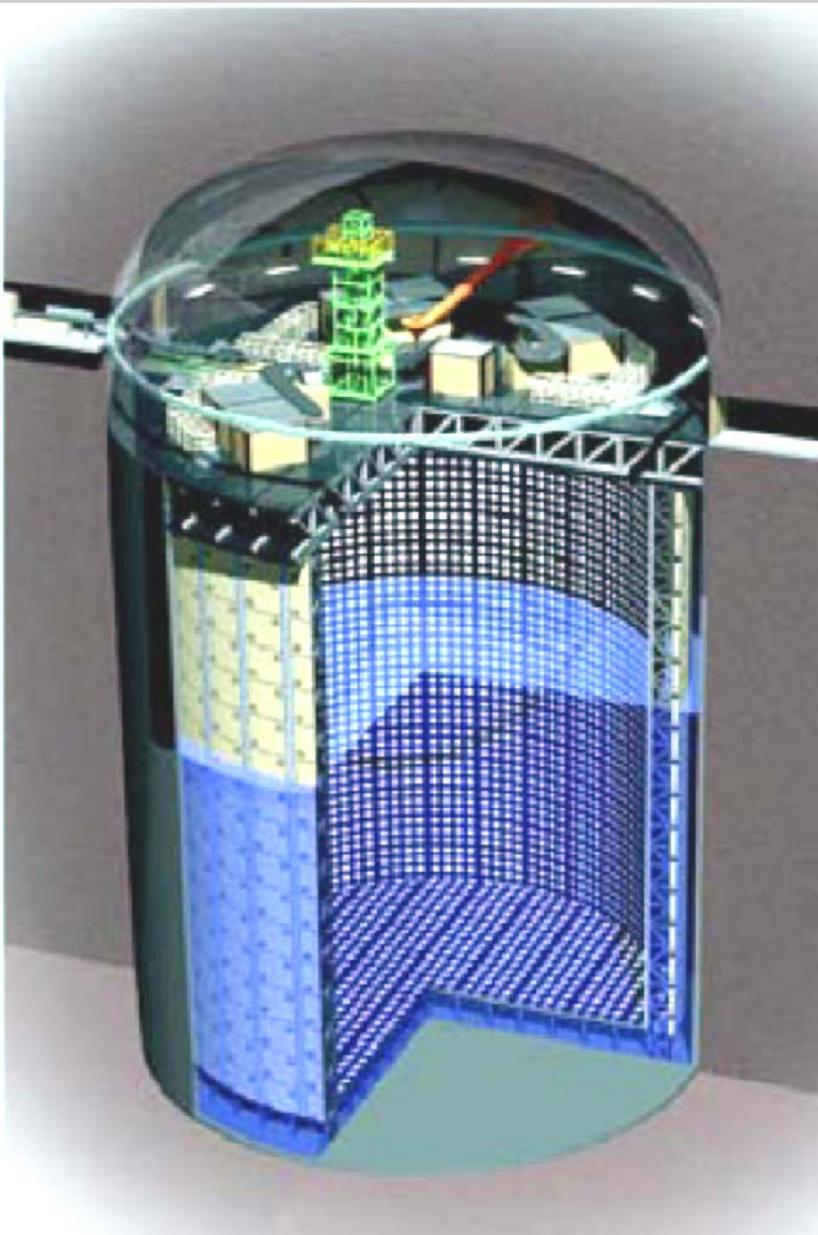
Paradox:
 $R_{Cl}(^8\text{B} + ^7\text{Be}) - R_{K_{II}}(^8\text{B}) \sim 0$
 (~15%)



**SuperK
(Japan)**

1996

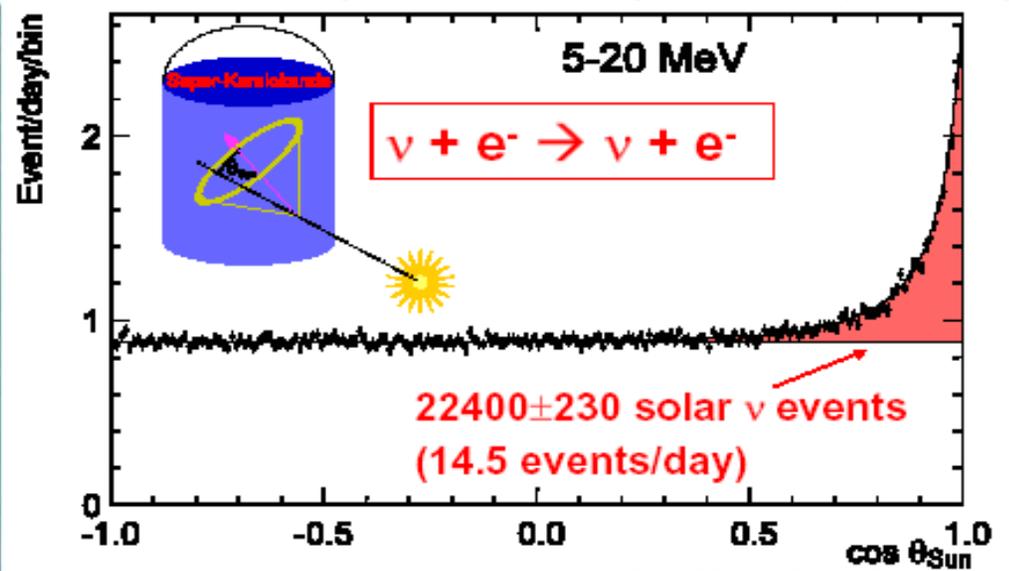
Super-Kamiokande (1996)



SK experiment:
 50,000 tons of water,
 surrounded by 11,000 PMTs
 to detect Cherenkov light
 in the water
 Fiducial Volume 22,500 tons

Super-Kamiokande-I solar neutrino data

May 31, 1996 – July 13, 2001 (1496 days)

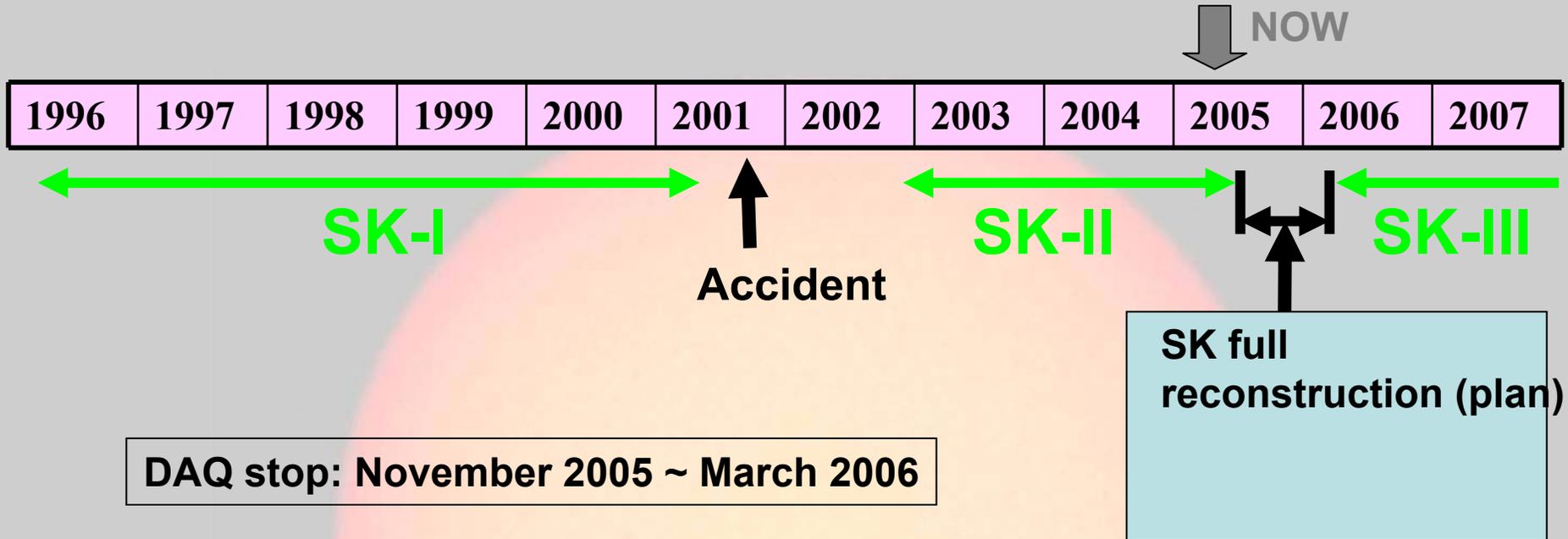


^8B flux : $2.35 \pm 0.02 \pm 0.08$ [$\times 10^6$ /cm²/sec]

$$\frac{\text{Data}}{\text{SSM(BP2004)}} = 0.406 \pm 0.004 \begin{matrix} +0.014 \\ -0.013 \end{matrix}$$

(Data/SSM(BP2000) = $0.465 \pm 0.005 \begin{matrix} +0.016 \\ -0.015 \end{matrix}$)

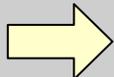
Schedule for Future



ID PMT: SK-II = ~5200 SK-III → 11146 (same as SK-I)
Original energy & vertex resolutions for low-energy events



Solar neutrinos below 5.0MeV with improved analysis tools and lower Rn backgrounds

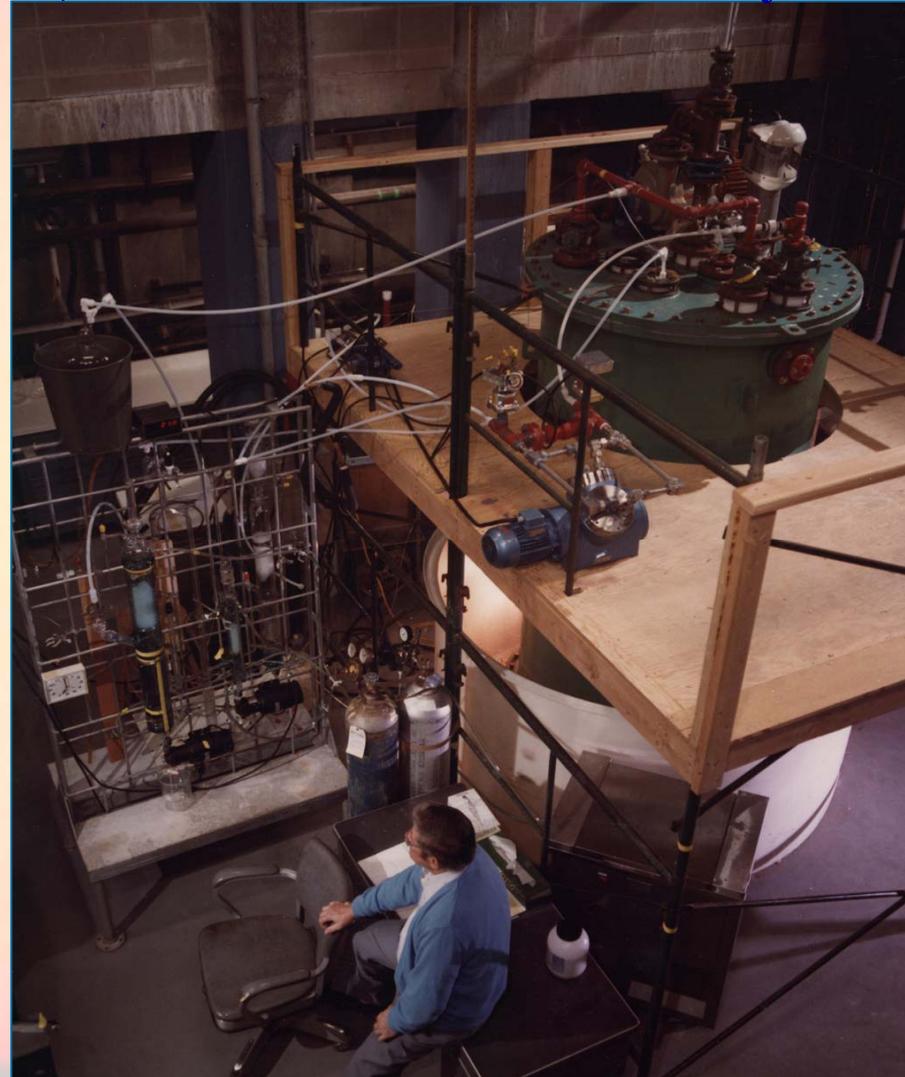


Precise study on spectrum distortion in SK-III

The Laboratory research to develop a gallium experiment began approximately in **1975**. In the United States this work took place at Brookhaven National Laboratory under direction of Ray Davis with participation of **J.Bahcall, B.Cleveland, C.Evans, G.Friedlander, K.Rowley, R.Stoener** from Brookhaven, and **W.Frati, K.Lande** from the University of Pennsylvania.

This group has chosen method with gallium chloride solution.

Methods of counting a few atoms of **^{71}Ge** were developed, the production rates of **^{71}Ge** by the various possible background processes (initiated by cosmic-ray muons, alpha particles from internal radioactive impurities, and external fast neutrons) were measured, and a pilot experiment with 1.3 tons of gallium was carried out.



In the Soviet Union at the **Institute for Nuclear Research** we began a laboratory research to develop gallium experiment about the same time in **1975** using gallium chloride solution.

But when we understood that our industry can not provide necessary purity in 50 tons of gallium chloride solution, and taking into account that metallic gallium is significantly less sensitive to radioactive impurities, we changed gallium solution for gallium metal. We used Davis' idea and independently developed technology of extraction minute quantities of **^{71}Ge** from many tons of metallic gallium.

New government **Decree** about production of **60 tons** of gallium of high purity was specially issued to provide our gallium experiment with gallium metal. By this, gallium had to have a status of **Statesreserve** and the INR had to be responsible for its safety.

Verification of the law of conservation of electric charge

I. R. Barabanov, E. P. Veretenkin, V. N. Gavrin, Yu. I. Zakharov, G. T. Zatsepin, G. Ya. Novikova, I. V. Orekhov, and M. I. Churmaeva
Institute of Nuclear Studies, USSR Academy of Sciences

(Submitted 22 June 1980)

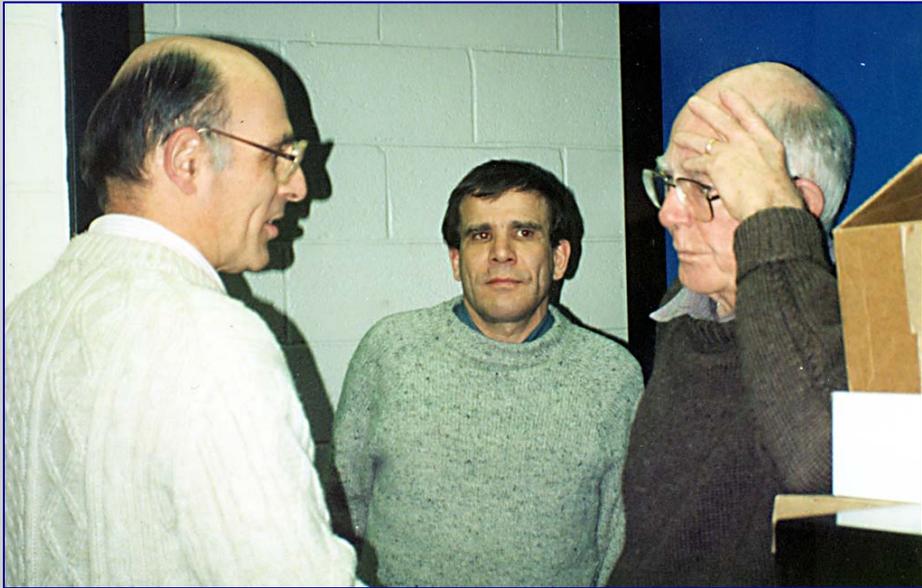
Pis'ma Zh. Eksp. Teor. Fiz. **32**, No. 5, 384–386 (5 September 1980)

A search for the $^{71}\text{Ga} \rightarrow ^{71}\text{Ge} + \gamma$ decay was undertaken to investigate the law of conservation of electric charge. An upper limit of $T \geq 2.3 \times 10^{23}$ yr was determined for the lifetime of Ga.

PACS numbers: 11.30.Er, 23.90.+w, 27.50.+e

НИИЯФ МГУ,
март 2009 г.,
Москва

БНО ИЯИ РАН
В.Н. Гаврин



In 1985 the pilot installation with 7.5 tons of metallic gallium was constructed in Troitsk.

In 1986 after consideration and discussions SAGE Collaboration agreements was signed and Viktor Matveev said: "Welcome!"



ПАРАМЕТРЫ УСПОИТЕЛИ	
МЕХАНИЧЕСКИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ ОУСЛОВИЯ ИИ	
ИЯИ ЯИ РОССИИ	
УСКОРЕНИЕ ЗЕРНА	1000
ВРЕМЯ	0.5-10
СРЕДНЯЯ СКОРОСТЬ	2.10 ⁷ -10 ¹⁰
МАССА	100 (2000)
С	100
В	50
МАССА	5000
МАССА	20000-100000
МАССА	100-1000
В	0.17
В	0.045
В	0.4
В	1.5-3
В	1.2
198.2	
199.2	

The SAGE Collaboration

Measurement of the Solar Neutrino Capture Rate with gallium metal

J.N.Abdurashitov, V.N.Gavrin*, S.V.Girin, V.V.Gorbachev, P.P.Gurkina,
T.V.Ibragimova, A.V.Kalikhov, N.G.Khairnasov, T.V. Knodel, I.N.Mirmov, A.A.Shikhin,
E.P.Veretenkin, V.M.Vermul, V.E.Yants, and G.T.Zatsepin*

Institute for Nuclear Research, Russian Academy of Sciences, 117312 Moscow, Russia

M.L. Cherry

Louisiana State University, Baton Rouge, Louisiana 70803

T.J. Bowles*, W.A. Teasdale and D.L. Wark

Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, New Mexico 87545, USA

J.S.Nico

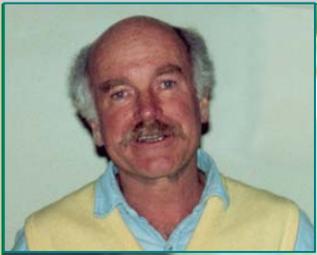
National Institute of Standards and Technology, Stop 8461, Gaithersburg, Maryland 20899, USA

B.T. Cleveland, S.R. Elliott, and J.F. Wilkerson*

University of Washington, Seattle, Washington 98195, USA

K. Lande, R. Davis, Jr., P. Wildenhain

*Department of Physics and Astronomy, University of Pennsylvania
Philadelphia, PA, 19104, USA*



SAGE

Global intensity of muon

$$- (3.03 \pm 0.19) \times 10^{-9} \text{ (cm}^2\text{/s)}$$

Average energy of muon

$$- 381 \text{ GeV}$$

Fast neutron flux (>3 MeV)

$$- (6.28 \pm 2.20) \times 10^{-8} \text{ (cm}^2\text{s)}^{-1}$$

$\text{Ga}_{\text{met}} \sim 50 \text{ tons}$

LGGNT

$$l = 60 \text{ m}$$

$$w = 10 \text{ m}$$

$$h = 12 \text{ m}$$

Low background

concrete – 60 cm



Инженерно-технические характеристики Лаборатории

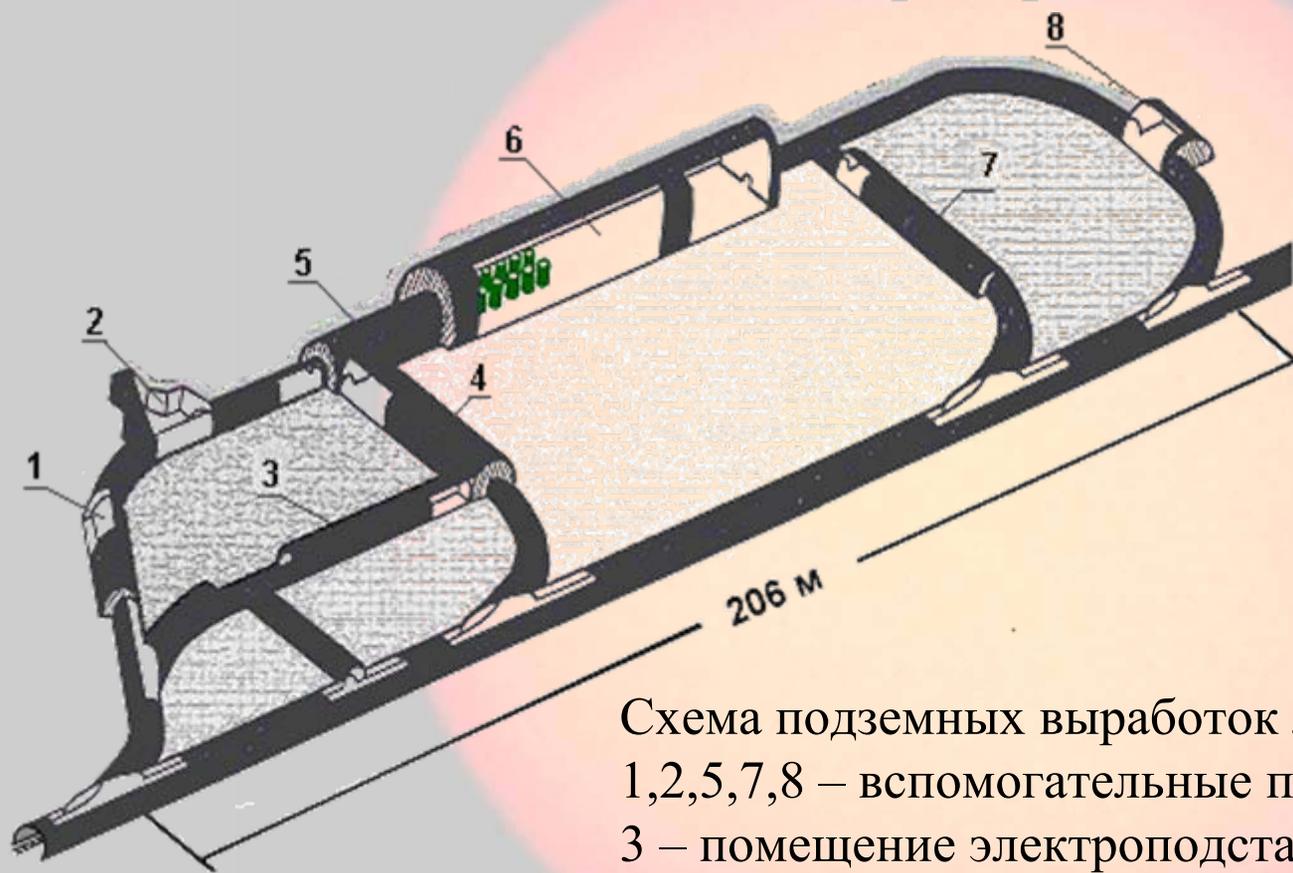


Схема подземных выработок лаборатории ГГНТ.

1,2,5,7,8 – вспомогательные помещения;

3 – помещение электроподстанции;

4 – помещение кондиционера;

6 – реакторный зал ГГНТ

Фоновые характеристики лаборатории

Мюоны космических лучей

Расчетная величина глобального потока интенсивности мюонов в месте расположения лаборатории ГГНТ составила: $N_{\text{расч}} = (2.7 \pm 1.3) \cdot 10^{-9} \text{ (см}^2 \cdot \text{сек)}^{-1}$

Измеренная, глобальная интенсивность мюонов в месте расположения ГГНТ:

$$N_{\text{изм}} = (3.03 \pm 0.10) \cdot 10^{-9} \text{ (см}^2 \cdot \text{сек)}^{-1}$$

Быстрые нейтроны от горных пород

- α -частицы + легкие ядра, деление урана 1.5 нейтрон сут⁻¹см⁻²
- $\Phi_{E_n > 6 \text{ МэВ}}$ ~ 1–7%
- Фон от быстрых нейтронов < 1%



Низкофоновые бетоны

Содержание радиоактивных элементов в окружающих лабораторию горных породах

$$^{238}\text{U} - (1.5-3.8) \cdot 10^{-6} \text{ г/г,}$$
$$^{232}\text{Th} - (1.9-2.5) \cdot 10^{-5} \text{ г/г}$$

Усредненные значения примесей урана и тория в бетоне ЦНИИЛ Оргпроекта совместного с ИЯИ АН СССР на основе дунита, кварцевого песка и портландцемента

$$1.58 \cdot 10^{-7} \text{ г U /г и}$$
$$6.73 \cdot 10^{-7} \text{ г Th /г.}$$

Быстрые нейтроны от горных пород

Измерения, выполненные с
радиохимическим детектором

$$N_{\text{ГГНТ}} = (6.28 \pm 2.20) \cdot 10^{-8} \text{ нейтрон} \cdot (\text{см}^2 \cdot \text{сек})^{-1},$$
$$N_{\text{ШТ}} = (5.20 \pm 0.6) \cdot 10^{-7} \text{ нейтрон} \cdot (\text{см}^2 \cdot \text{сек})^{-1}$$

Измерения, выполненные с
детектором реального времени:

$$N_{\text{ГГНТ}} < 1.4 \cdot 10^{-7} \text{ нейтрон} \cdot (\text{см}^2 \cdot \text{сек})^{-1},$$
$$N_{\text{ШТ}} = (7.2 \pm 1.5) \cdot 10^{-7} \text{ нейтрон} \cdot (\text{см}^2 \cdot \text{сек})^{-1}$$

Кратность ослабления потока
быстрых нейтронов

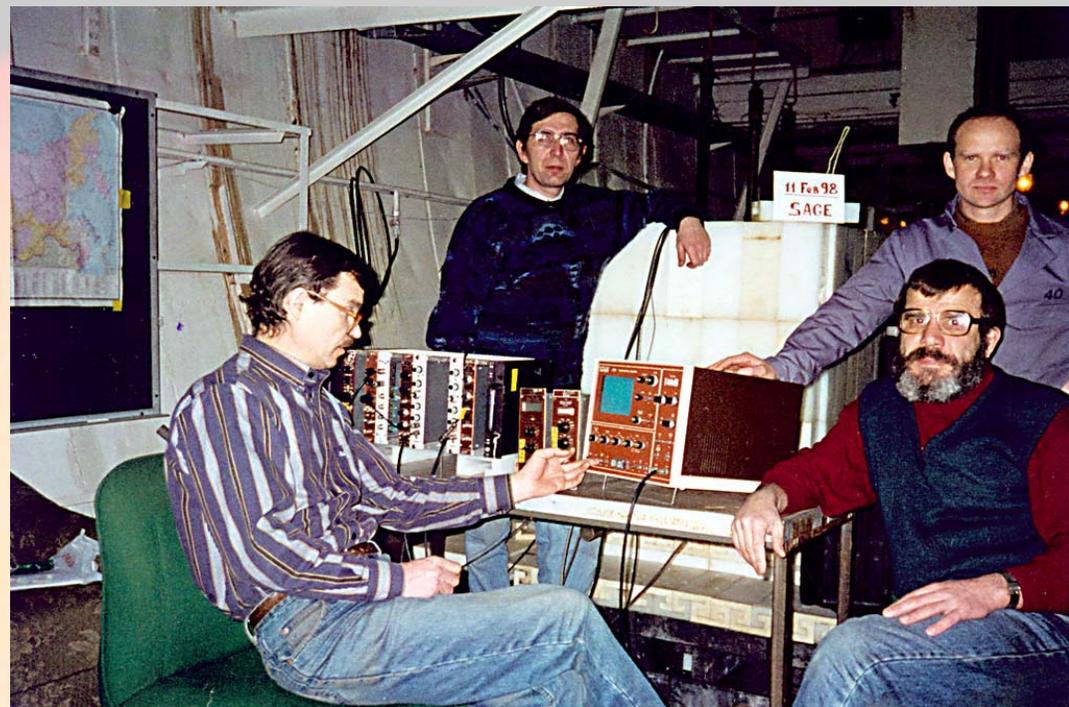
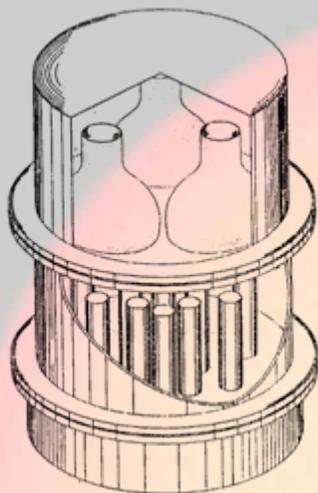
— 8 (>3 МэВ);

Кратность ослабления γ -фона

— 15 – 16 раз (0.2 ÷ 3.2 МэВ).

НИИЯФ МГУ,
март 2009 г.,
Москва

БНО ИЯИ РАН
В.Н. Гаврин



- Energy range: 1-15 MeV
- Sensitivity: $10^{-6} \div 10^{-7} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
- Detection efficiency:
 0.11 ± 0.01 ($E_n > 1 \text{ MeV}$)
- Energy resolution: $\sim 60\%$
- Scintillator volume: 30 l
- Sizes: $\varnothing 36 \times 36 \text{ cm}^3$
- Mass: 50 kg

Neutron flux, $\times 10^{-7} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$

(1.0–11.0 Energy range, for $\varepsilon_E = 0.11 \pm 0.01$)

Internal background of the detector (H ₂ O + Borated Polyethylene shield)	6.5 ± 2.1
Surrounding mine rock (at 4800 m.w.e.)	7.3 ± 2.4
SAGE main room	< 1.4

НИИЯФ МГУ,
март 2009 г.,
Москва

^{71}Ge $T_{1/2} = 11,43 \text{ d}$

^{71}Ga

Electron capture

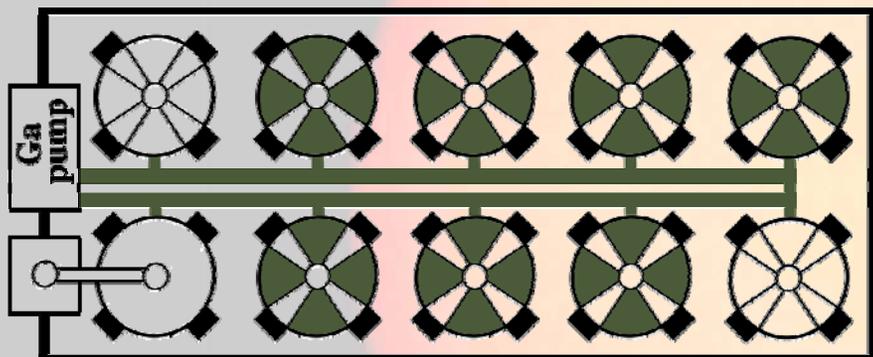
Обзор эксперимента

$^{71}\text{Ga}(\nu_e, e^-)^{71}\text{Ge}$, $E_{\text{th}} = 233 \text{ keV}$

SAGE

168 ранов (Янв.1990 – Дек.2007) : $65.4^{+4.0}_{-4.1} \text{ SNU}$

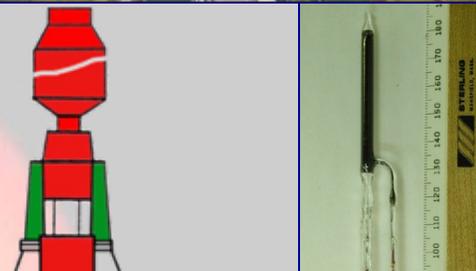
План расположения реакторов ГГНТ



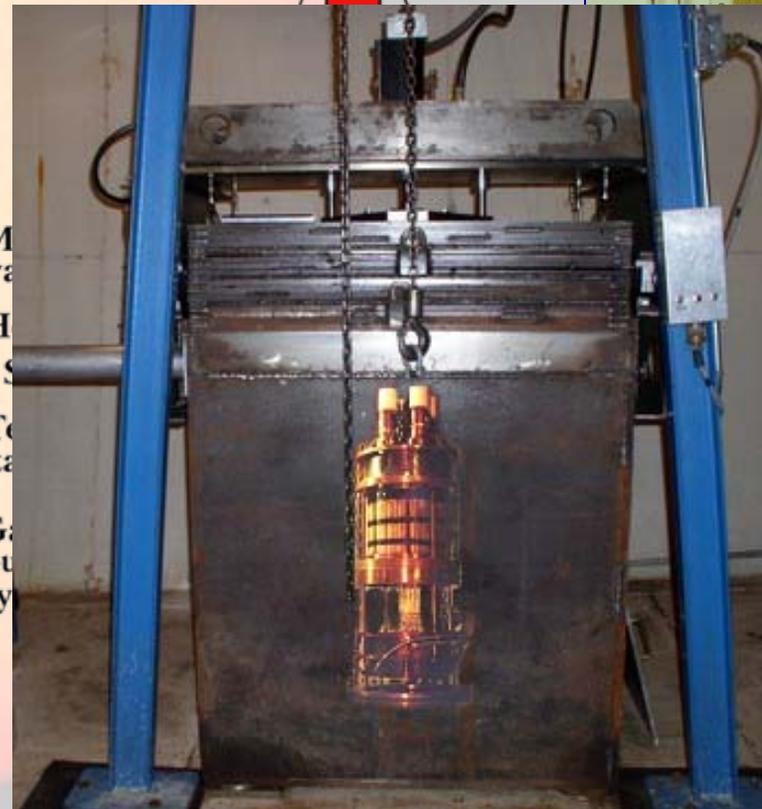
- 250 мкг носителя Ge-76/72 распределяется между реакторами
- Время экспозиции ~ 27 дней
- Химическое извлечение ^{71}Ge из металлического Ga в водный раствор ~ 1.5м³
- Концентрация Ge в 50 см³ безтритевой воды
- Синтез моногермана – GeH_4
- Регистрация распадов ^{71}Ge

Чувствительность:

один атом ^{71}Ge в 5×10^{29} ат. Ga с эффективностью ~ 90%



Mixer motor



Система регистрации

- Счетчики устанавливаются в систему регистрации.
- Специально оборудованная комната.
Стены комнаты:
 - бетон н.ф. 70 см;
 - сталь 1 см;
 - оцинкованное железо 1 мм.
- Пассивная защита:
железо, свинец, медь и вольфрам.
- Внутри пассивной защиты счетчики помещаются в колодец кристалла NaI детектора активной защиты.



Одновременно в колодце NaI может быть размещено
8 счетчиков

Работа счетной системы может осуществляться в режимах: сбора событий и калибровки.

Для каждого события в режиме сбора регистрируются:

номер счетного канала, энергия, величина амплитуды продифференцированного импульса, время прихода события, энергия и время совпадения с сигналом в канале NaI, две оцифрованные формы импульсов.

Скорость образования ^{71}Ge :

коэффициент перевода скорости захвата солнечных нейтрино галлием (SNU) в скорость образования атомов ^{71}Ge в мишени:

$$2.977 \cdot 10^{-4} \text{ (атомов } ^{71}\text{Ge} / (1 \text{ SNU} \cdot 1 \text{ день} \cdot 1 \text{ т галлия))} \times \text{SNU} \times 50 \text{ т галлия (атомов } ^{71}\text{Ge} \text{ в сут.)}$$

ССМ для Ga 129 SNU

– для 50 т Ga скорость захвата $p = 1.92 \text{ сут}^{-1}$

За время экспозиции θ в мишени образуется $N = \frac{p}{\lambda} (1 - e^{-\lambda\theta})$ атомов ^{71}Ge

При $\theta = 25$ сут. ожидаемое число атомов $N=25$

Измеренная скорость захвата 65 SNU, т.е. $N \approx 12$

Эффективности:

химические процедуры	$\epsilon_{\text{хим}}$	- 0.92
отбор импульсов	$\epsilon_{\text{счёт}}$	- 0.70
живое время счёта	Δ	- 0.80
		$\epsilon = \text{П}\epsilon_i \sim 0.52$

Число регистрируемых импульсов $N \cdot \epsilon \sim 7$

Счет распадов ^{71}Ge :

Пропорциональные счётчики

$V \sim 0.6 \text{ см}^3$, $\text{Xe} + 10\% \text{ GeH}_4$, $P \sim 1 \text{ атм}$

Счёт – 5 месяцев ($T_{1/2} = 11.43 \text{ сут}$ [W. Hampel and L. Remsberg, Phys. Rev. C 31, 666 ~1985].)

$\sim 2 \text{ имп/сут} \rightarrow 300 \text{ импульсов в 1 ране}$

Отбор событий:

- 1) NaI ($\times 2/3$)
- 2) энергетические окна K- и L-пигов ($\times 1/3$)
- 3) T_N ($\times 1/3$)

После отбора остаётся 15-20 событий

Число распадов ^{71}Ge определяется временным анализом ($N \sim 7$)

Пуассоновская статистика: $\delta\Pi = \frac{1}{\sqrt{N}} \sim 40\%$

При ненулевом фоне неопределённость : $\delta \sim 1.5 \cdot \delta\Pi \sim 60\%$



SAGE

январь 1990 – декабрь 2007

168 ранов, 310 separate counting sets

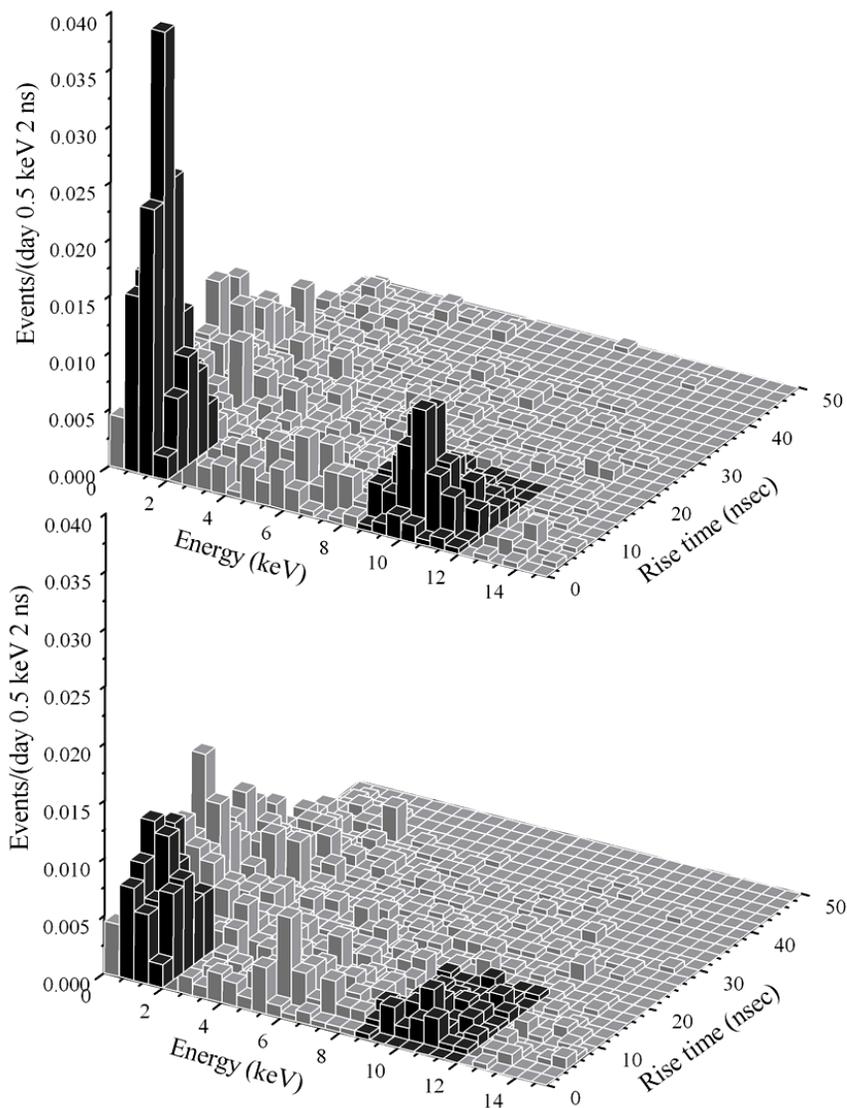
$65.4^{+3.1}_{-3.0}$ (стат) $^{+2.6}_{-2.8}$ (сист) SNU

$65.4^{+4.0}_{-4.1}$ SNU

L $67.2^{+4.8}_{-4.6}$ SNU

K $64.0^{+4.1}_{-4.0}$ SNU

Полученный из аппроксимации период полураспада для всех отобранных в L- и K-пиках событий - 11.5 ± 0.9 (стат.) дня, что хорошо согласуется с измеренной в (W. Hampel and L. Remsberg, Phys. Rev. C 31 1985) величиной 11.43 ± 0.03 дня.



Распределение событий по энергии и времени нарастания импульсов для 77 солнечных ранов. Положение L- и K-пиков ^{71}Ge , определенное по калибровкам ^{55}Fe , оказано темным цветом.

Верхняя панель: Комбинация фоновых событий и событий от ^{71}Ge , зарегистрированных в течение первых 30 дней счета после извлечения. Живое время счета 1999.8 дней, полное число событий - 2063. 427 событий находится в области L-пика и 287 событий – в области K-пика.

Нижняя панель: та же гистограмма для всех событий, зарегистрированных через 100 дней счета после извлечения, за такой же интервал живого времени как и на верхней панели, полное число событий – 1545. 226 событий находится в области L-пика и 94 события – в области K-пика.

30,3 t of Ga



GALLEX: ГАЛЛиевый ЭКСперимент

Подземная лаборатория Гран Сассо, Италия,
толщина горных пород: 3300 м.в.э.

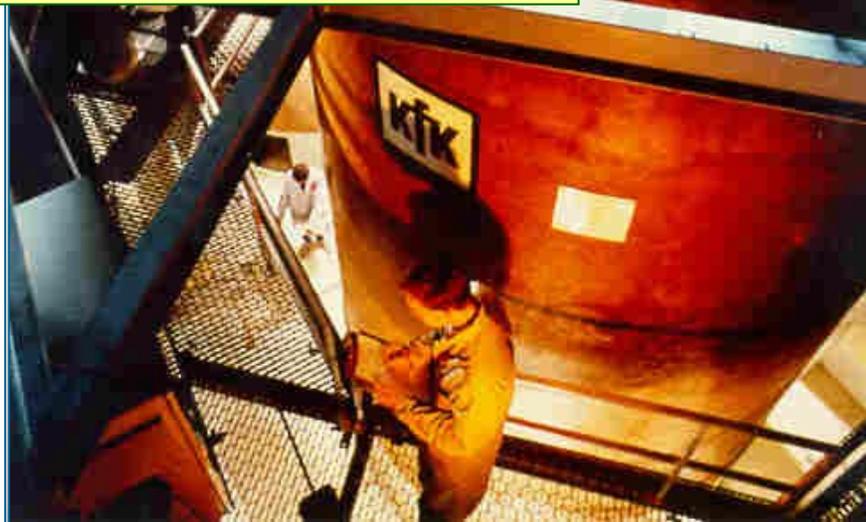
30.3 тонн галлия в 101 тонне раствора хлорида
галлия ($\text{GaCl}_3 - \text{HCl}$)

Набор данных: Май 1991-Янв. 1997, 65 ранов

GNO: Галлиевая Нейтринная Обсерватория

Преимник **GALLEX**, **GNO: 30.3 тонн галлия**

Набор данных: Май 1998 – Апр. 2003, 58 ранов





Ga-эксперименты



Измерение скорости захвата солнечных нейтрино
- на металлическом галлии:

SAGE, 50 тонн металлического ${}^{71}\text{Ga}$

168 ранов за 18-летний период (Янв 1990 – Дек 2007) дают результат: $65.4^{+4.0}_{-4.1} \text{SNU}$
(1 SNU = 1 захват нейтрино/сек в мишени, содержащей 10^{36} атомов нейтрино поглощающего изотопа).

Хорошее согласие между результатами **Ga экспериментов** увеличивает достоверность получаемых результатов. Это была замечательная ситуация, что в течение нескольких лет существовали два **Ga** эксперимента, **SAGE** и **GALLEX/GNO**, которые вели набор данных в одно и то же время и действительно заслуживает большого сожаления тот факт, что эксперимент **GNO** был остановлен по ненаучным причинам.

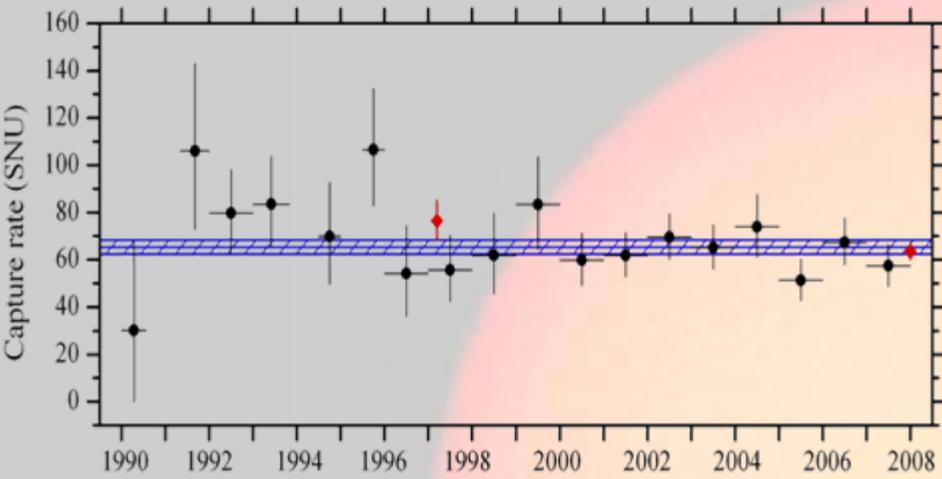
Средневзвешенная величина результатов всех
Ga экспериментов составляет в настоящее время
 $66.1 \pm 3.1 \text{ SNU}$



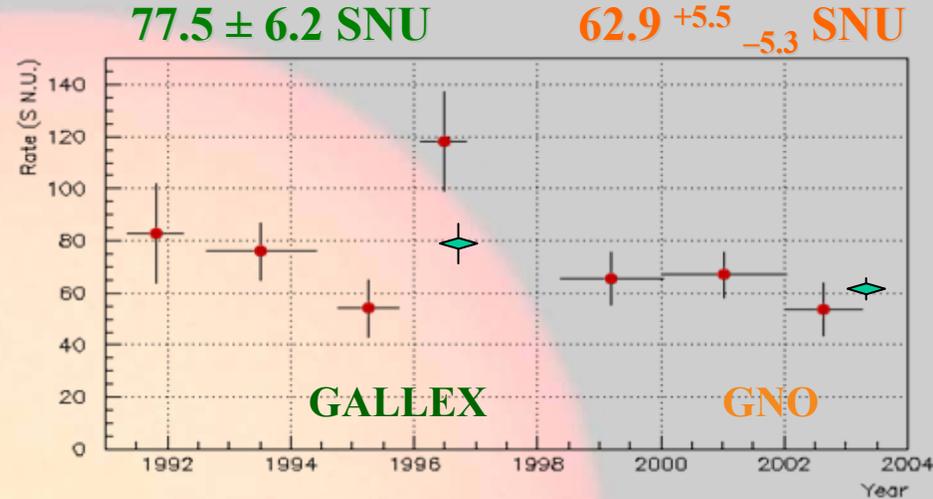
НИИЯФ МГУ,
март 2009 г.,
Москва



БНО ИЯИ РАН
В.Н. Гаврин



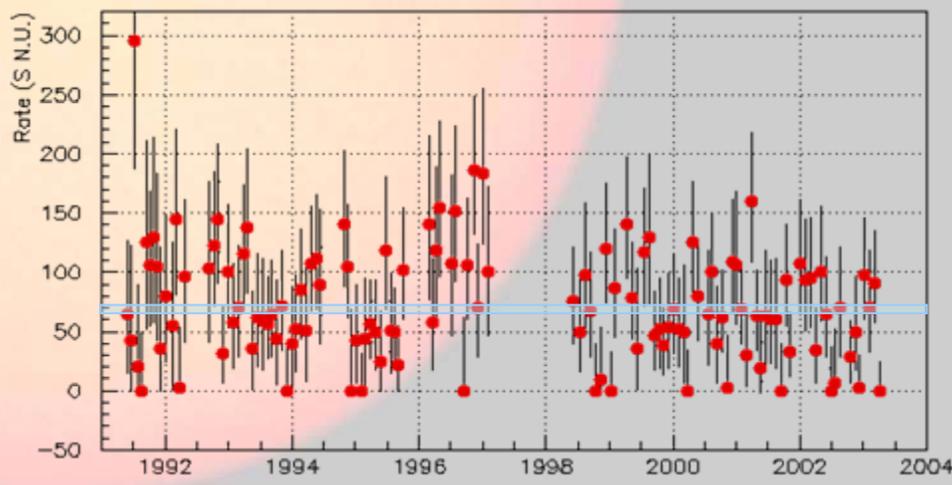
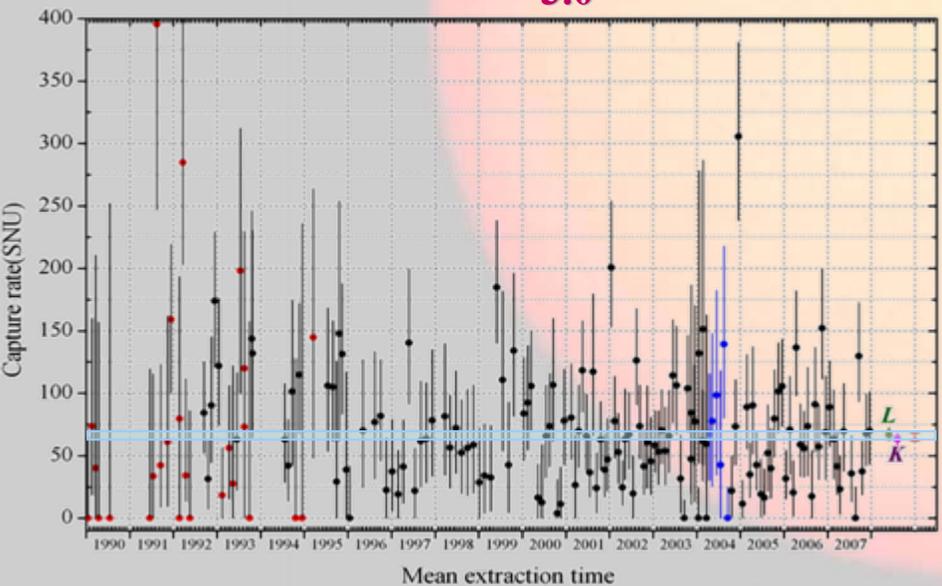
$65.4^{+3.1}_{-3.0}$ SNU



77.5 ± 6.2 SNU

$62.9^{+5.5}_{-5.3}$ SNU

69.3 ± 4.1 SNU



Ga эксперименты:

- «have given a great impact upon a view of neutrino oscillation and have supplied most important motivation for creation of **SNO**

* **1990 - SAGE shows greatly suppressed Ga rate**

* **1990 - Start of construction of SNO»**

(David Sinclair, May 2007)

* впервые показали, что подавляющая часть солнечных нейтрино, достигающих Земли, это низкоэнергетические нейтрино от **pp** реакции

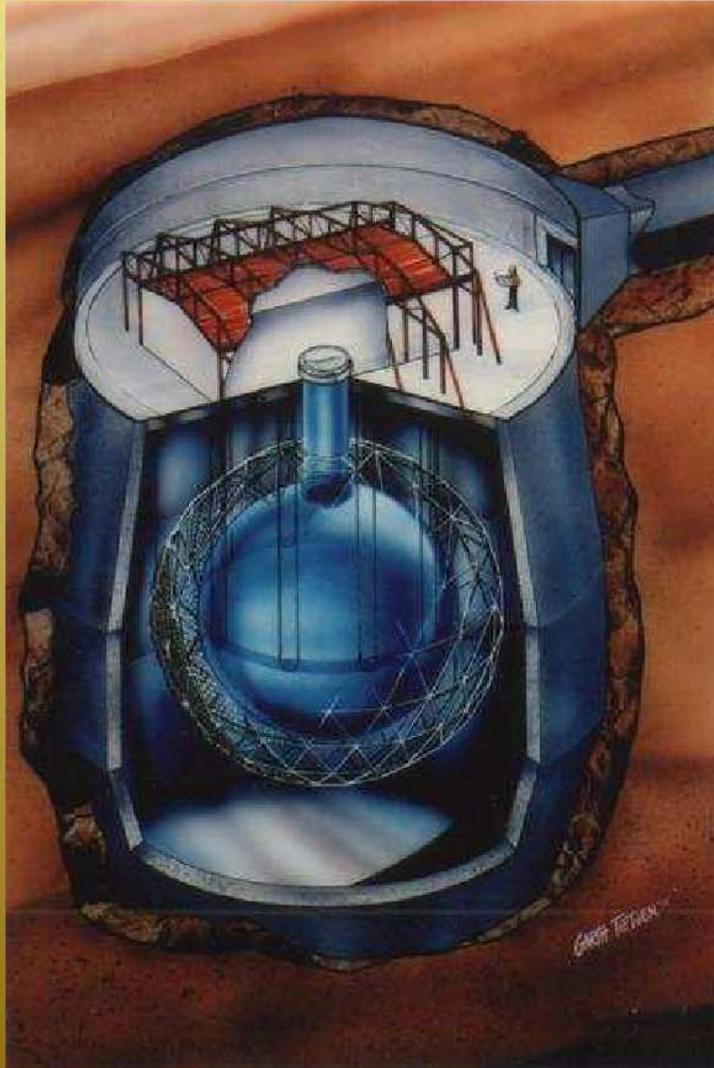
* показывают отличное согласие между теорией и экспериментом. Более того, точность измерений в эксперименте достигла точности теоретических предсказаний

* в настоящее время обеспечивают единственное прямое измерение скорости **pp** реакции

* развили технологию изготовления интенсивных искусственных источников нейтрино – идеального инструмента для калибровки детекторов солнечных нейтрино низких энергий, и которые также могут быть использованы для исследования свойств нейтрино

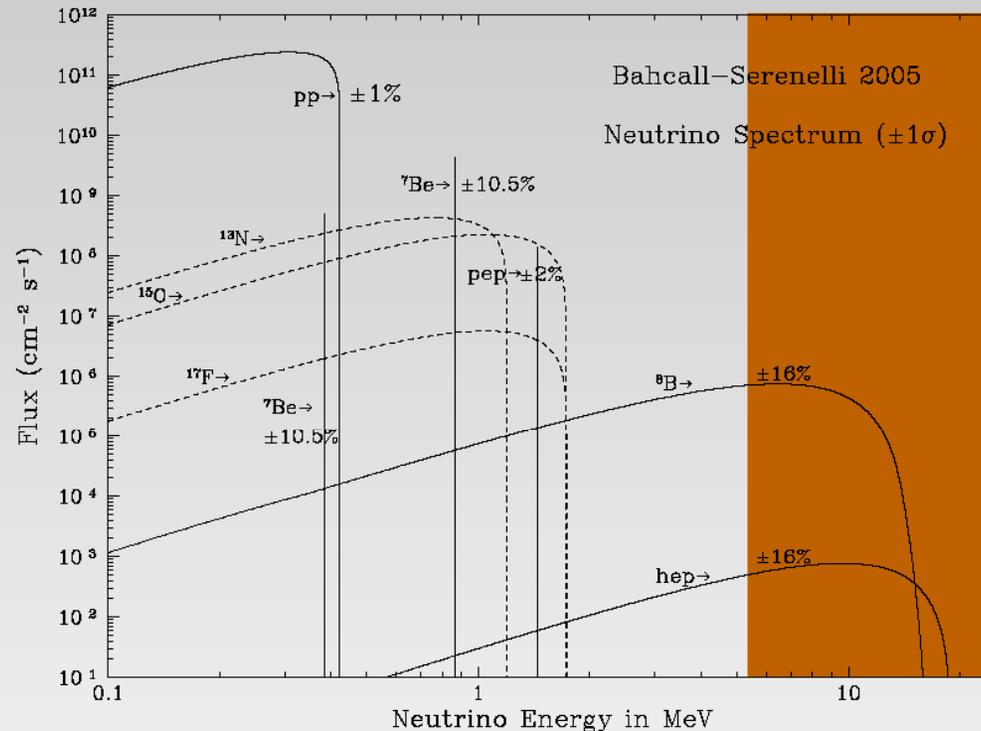
Sudbury Neutrino Observatory

с 2001 г.



- 2092m underground (6010m water equivalent)
- 1000t of heavy water on loan from AECL in 12m diameter acrylic vessel surrounded by light water
- 9465 Hamamatsu PMTs (60% coverage)
- In phase II (Salt phase) 2000kg of NaCl dissolved in D₂O
- Currently in phase III (NCD phase) ³He Counters in D₂O

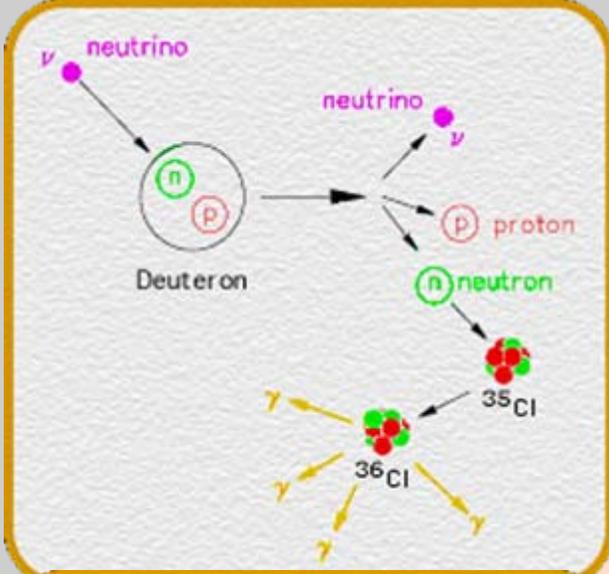
Solar Neutrino Energy Spectrum



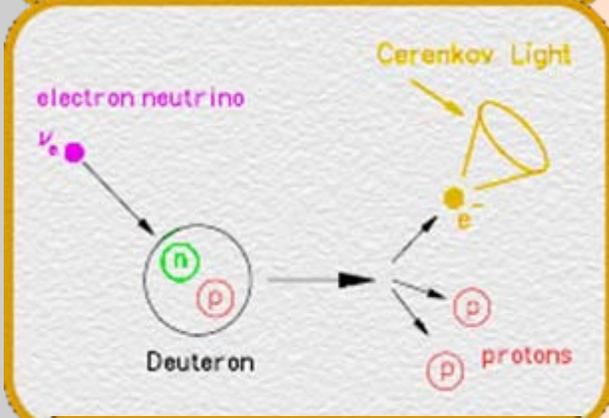
- SNO energy threshold for salt phase 5.5 MeV
- SNO is sensitive to ^8B neutrinos

SNO is sensitive to

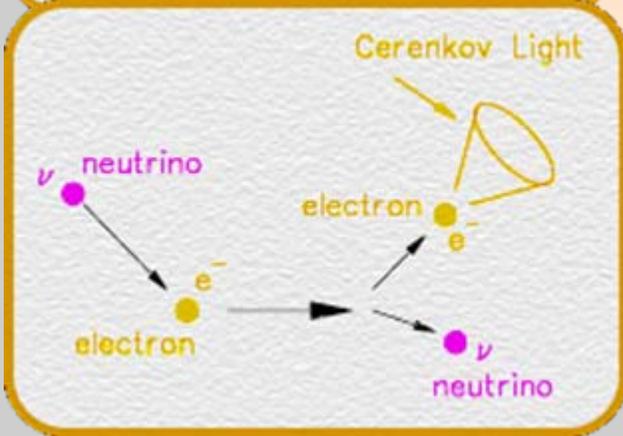
- Neutral current reactions with any neutrino flavour

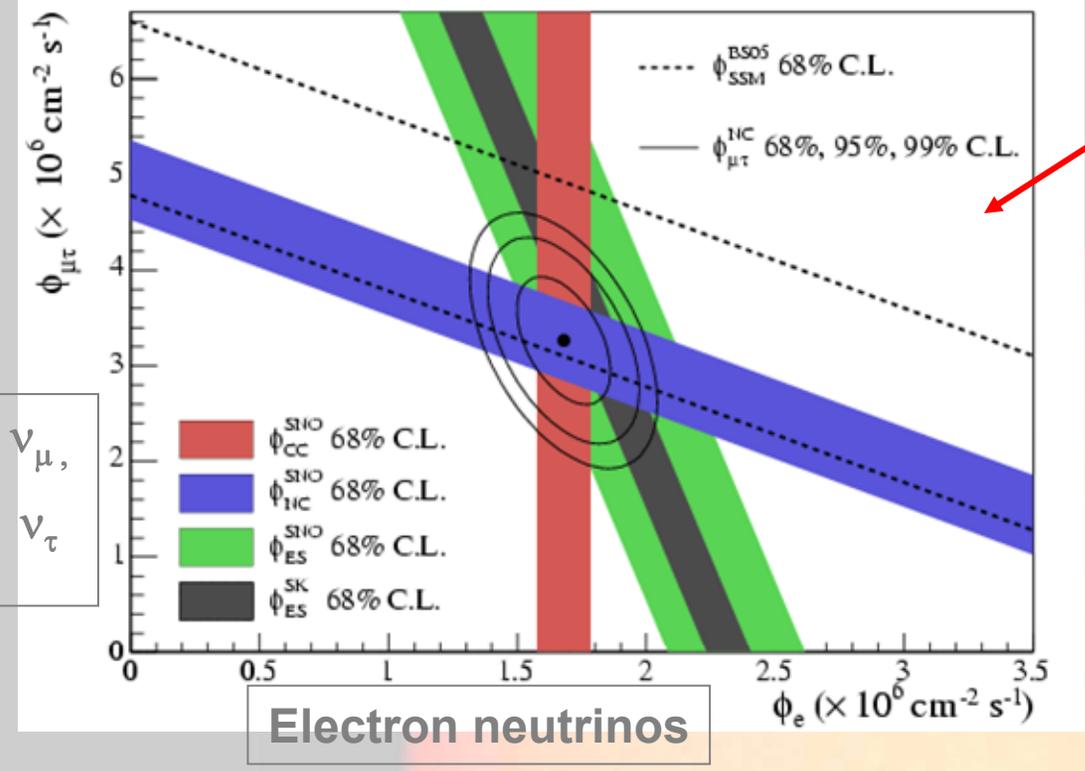


- Charged current reactions with electron neutrinos



- Elastic scattering with predominantly ν_e





Flavor change determined by $> 7 \sigma$.

CC, NC FLUXES MEASURED INDEPENDENTLY

The Total Flux of Active Neutrinos is measured independently (NC) and agrees well with solar model

Calculations:
 5.82 +/- 1.3 (Bahcall et al),
 5.31 +/- 0.6 (Turck-Chieze et al)

$$\phi_{CC} = 1.68^{+0.06}_{-0.06}(\text{stat.})^{+0.08}_{-0.09}(\text{syst.})$$

$$\phi_{NC} = 4.94^{+0.21}_{-0.21}(\text{stat.})^{+0.38}_{-0.34}(\text{syst.})$$

$$\phi_{ES} = 2.35^{+0.22}_{-0.22}(\text{stat.})^{+0.15}_{-0.15}(\text{syst.})$$

(In units of $10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)

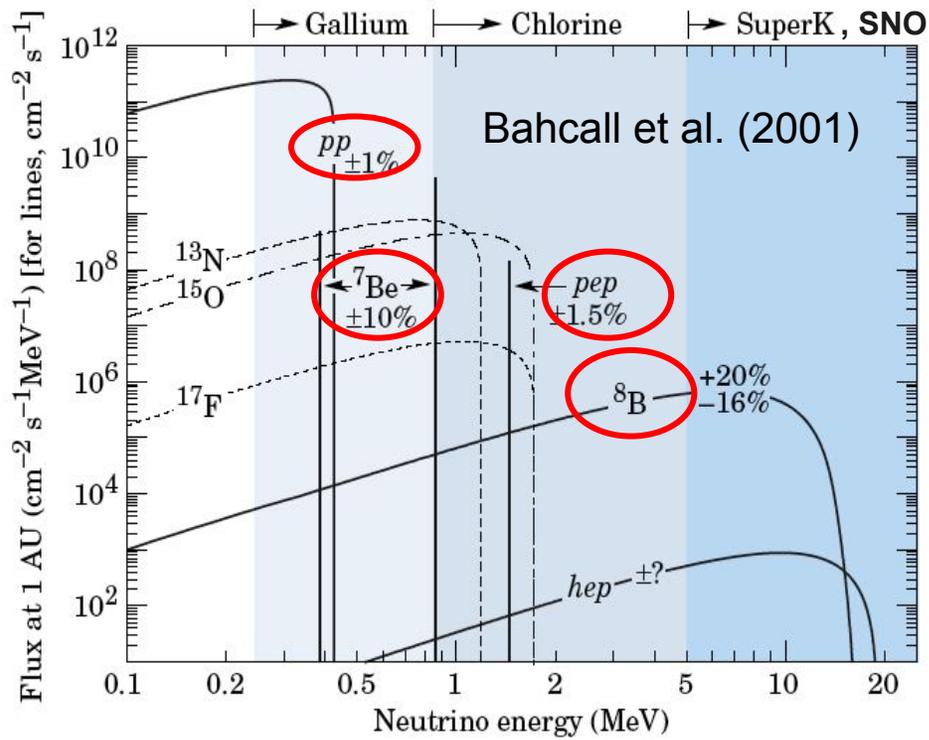
$$\frac{\phi_{CC}}{\phi_{NC}} = 0.34 \pm 0.023(\text{stat.})^{+0.029}_{-0.031} = \cos^4 \theta_{13} \sin^2 \theta_{12}$$

Improved accuracy for θ_{12} .



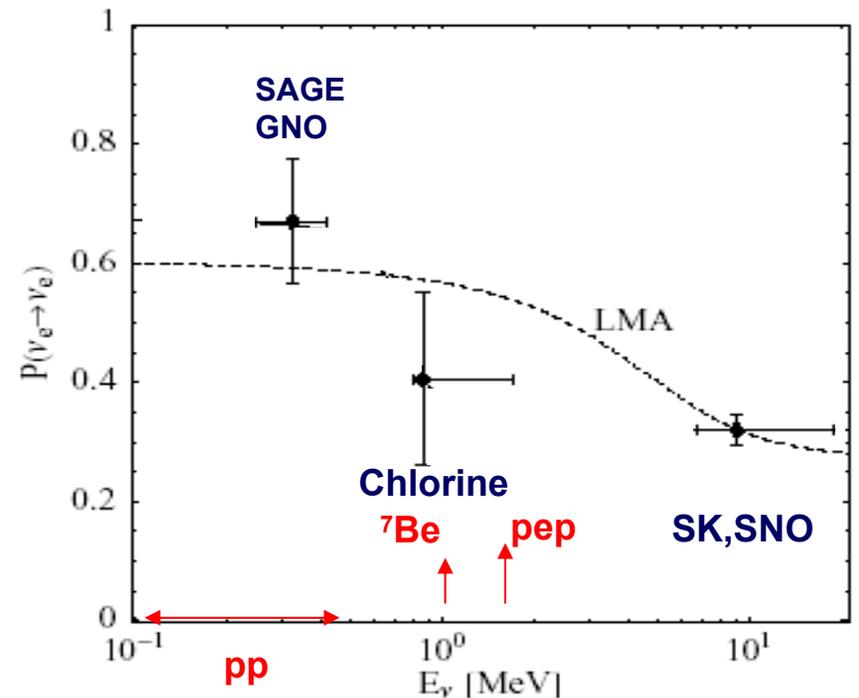
Oscillations for Solar Neutrinos

Solar Model Flux Calculations

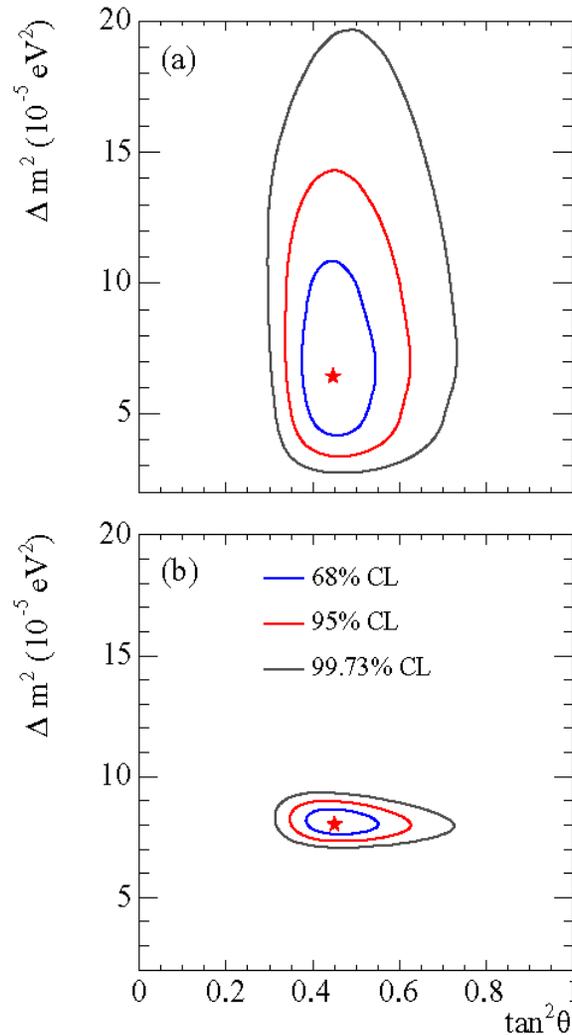


Matter Interaction Effect: LMA

Current Data for ν_e Survival



Salt Results



- Global solar neutrino analysis (a)
- Global analysis including Kamland data (766 ty data, b)
- contains Cl, Sage, Gallex/GNO and SK-1 zenith data
- ^8B flux free in fit, hep flux fixed to $9.3 \times 10^3 \text{ cm}^{-1} \text{ s}^{-1}$

Borexino - 2008

- 8" PMT – 2212
- Scintillator – 278.3 ton
- Energy region – (250 – 800) KeV
- SSM (osc.) – (49 ± 4) counts/day 100ton
without osc. – (75 ± 4) counts/day 100ton

Exp. – (49 ± 3) cpd/100 tons

•Borexino is located under the Gran Sasso mountain which provides a shield against cosmic rays (4000 m water equivalent);

Core of the detector: 278 tons of liquid scintillator contained in a nylon vessel of 4.25 m radius (PC+PPO);

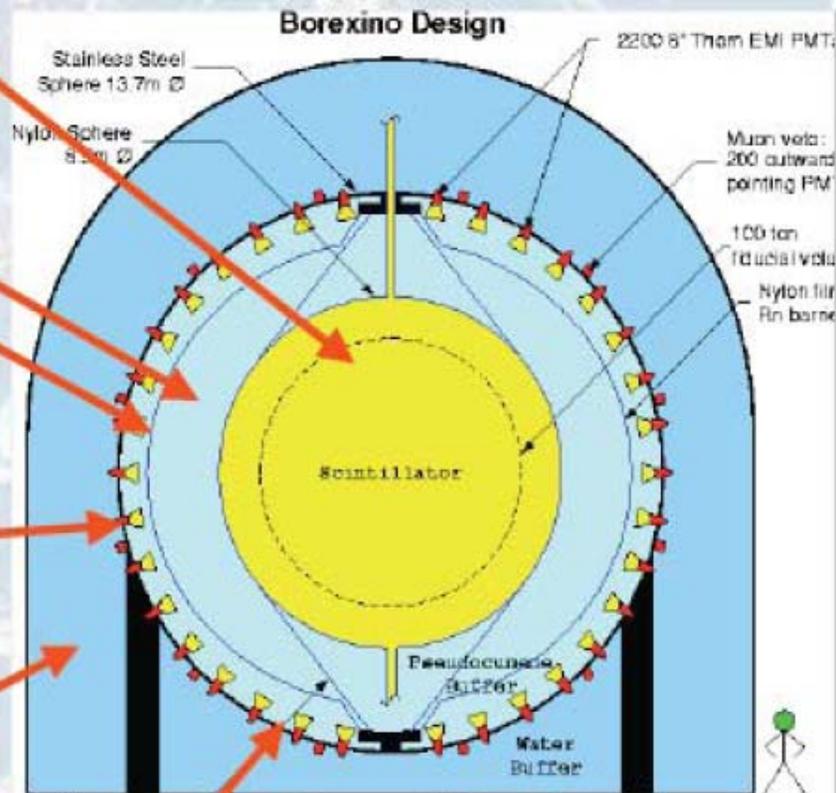
1st shield: 890 tons of ultra-pure buffer liquid (PC+quencher) contained in a stainless steel sphere of 6.75 m radius;

External nylon vessel; it is a barrier against Rn emitted by PMT and s.steel

2214 photomultipliers pointing towards the center to view the light emitted by the scintillator (1843 with opt. concentr.)

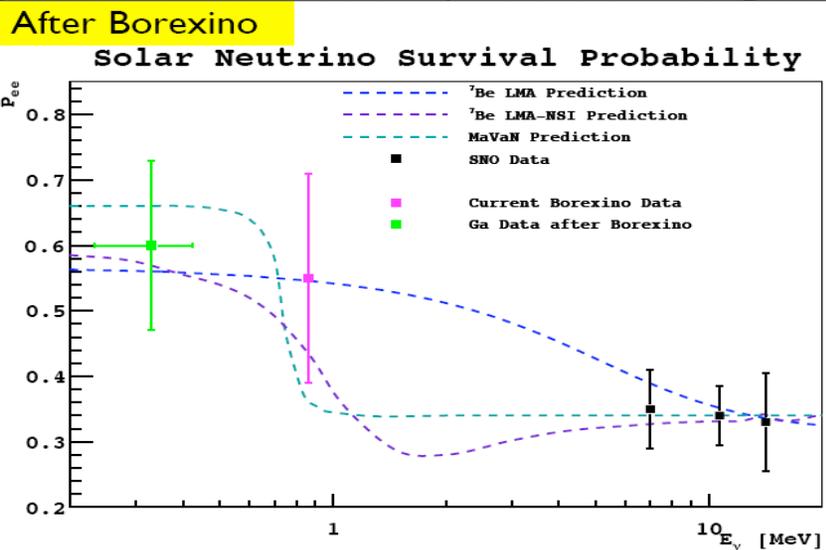
2nd shield: 2100 tons of ultra-pure water contained in a cylindrical dome;

200 PMTs mounted on the SSS pointing outwards to detect light emitted in the water by muons crossing the detector;



${}^7\text{Be}$: $49 \pm 3_{\text{stat}} \pm 4_{\text{sys}}$ cpd/100 tons

	Expected rate (cpd/100 t)
No oscillation	75 ± 4
BPS07(GS98) HighZ	48 ± 4



Under the assumptions of High-Z SSM the measurement corresponds to

$$P_{ee} = 0.56 \pm 0.1 \text{ (1s) at } E=862 \text{ keV}$$

which is consistent with the number derived from the global fit to all solar and reactor experiments

Borexino results

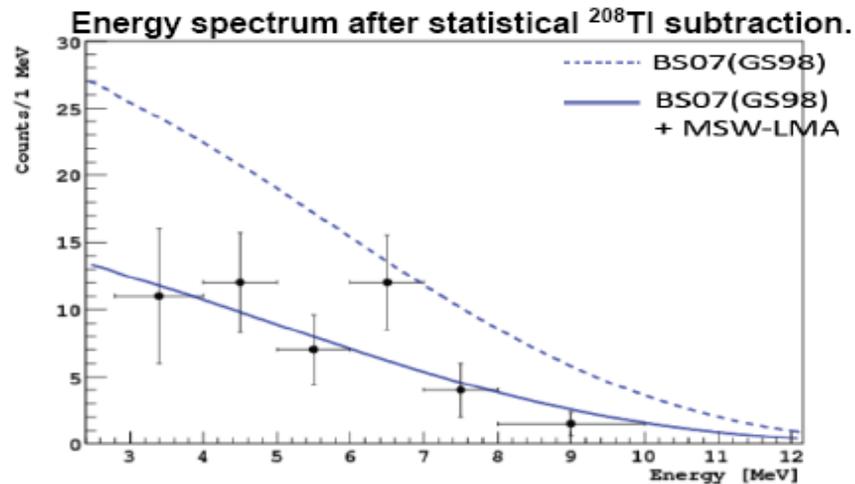
${}^8\text{B}$ solar neutrino flux

First real-time measurement down to 2.8 MeV:

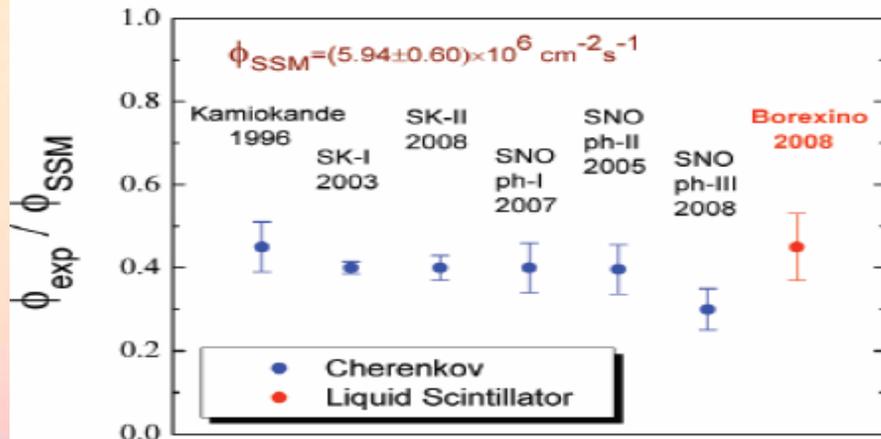
$$Rate_{>2.8\text{MeV}} = (0.26 \pm 0.04_{\text{stat}} \pm 0.02_{\text{sys}}) \text{ counts/day/100 tons}$$

Above 5 MeV in agreement with SNO and SuperK:

$$Rate_{>5\text{MeV}} = (0.14 \pm 0.03_{\text{stat}} \pm 0.01_{\text{sys}}) \text{ counts/day/100 tons}$$

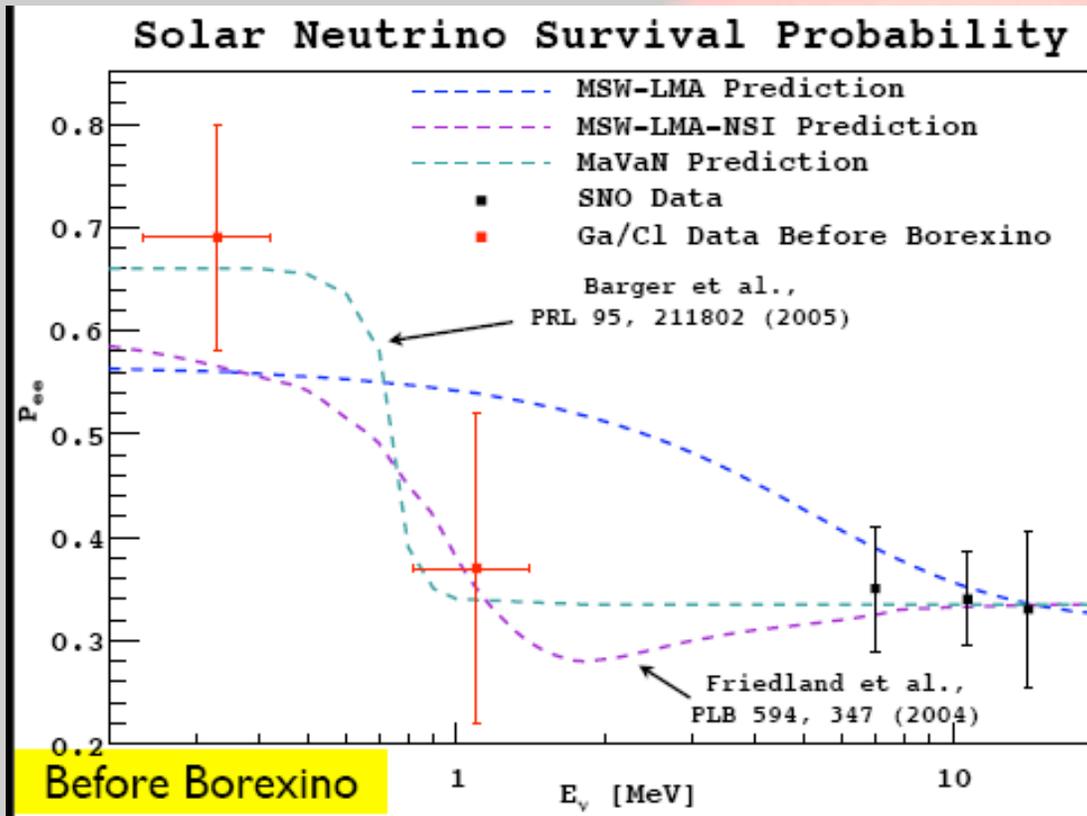


${}^8\text{B}$ solar neutrino flux measurements via elastic scattering



Solar neutrino survival probability

BEFORE BOREXINO



Low energy neutrinos:
flavor change dominated
by vacuum oscillations;

High energy neutrinos:
Resonant oscillations in matter
(MSW effect):
Effective electron neutrino mass
is increased due to the charge
current interactions
with electrons of the Sun

Transition region:
Decrease of the ν_e survival
probability (P_{ee})

Vacuum regime

Matter regime

Comparison of gallium result to predictions standard of solar model

$$R = \sum_i \phi_i^\odot \langle P_i^{ee} \rangle \langle \sigma_i \rangle$$

i - (*pp*, ⁷*Be*, *pep*, ¹³*N*, ¹⁵*O*, ¹⁷*F*, ⁸*B*, and *hep*)

Capture rates R_i for Ga experiment

$$R_i = \phi_i^{\odot} \langle P_i^{ee} \rangle \langle \sigma_i \rangle$$

Spect. comp.	With GS98 composition (high metallicity)							With AGS05 composition (low metallicity)						
	Cap. rate (SNU)	Percent uncertainty in rate due to					Total unc. in rate (%)	Cap. rate (SNU)	Percent uncertainty in rate due to					Total unc. in rate (%)
	ϕ	σ	Δm_{12}^2	θ_{12}	θ_{13}			ϕ	σ	Δm_{12}^2	θ_{12}	θ_{13}		
<i>pp</i>	39.27	+0.8,-0.8	+2.4,-2.3	+0.0,-0.0	+3.0,-2.7	+0.0,-3.7	+3.9,-5.1	39.73	+0.8,-0.8	+2.4,-2.3	+0.0,-0.0	+3.0,-2.7	+0.0,-3.7	+3.9,-5.1
<i>pep</i>	1.43	+1.3,-1.3	+17.0,-2.4	+0.2,-0.3	+2.4,-2.0	+0.0,-3.5	+17.2,-4.9	1.48	+1.3,-1.3	+17.0,-2.4	+0.2,-0.3	+2.4,-2.0	+0.0,-3.5	+17.2,-4.9
⁷ Be	18.75	+5.0,-5.0	+7.0,-2.3	+0.1,-0.1	+2.8,-2.4	+0.0,-3.6	+9.1,-7.0	16.79	+5.0,-5.0	+7.0,-2.3	+0.1,-0.1	+2.8,-2.4	+0.0,-3.6	+9.1,-7.0
¹³ N	0.91	+20.0,-15.0	+9.8,-2.3	+0.1,-0.1	+2.8,-2.4	+0.0,-3.6	+22.4,-15.8	0.60	+20.0,-15.0	+9.8,-2.3	+0.1,-0.1	+2.8,-2.4	+0.0,-3.6	+22.4,-15.8
¹⁵ O	1.26	+23.0,-16.0	+12.9,-2.3	+0.2,-0.2	+2.6,-2.2	+0.0,-3.5	+26.5,-16.7	0.78	+23.0,-16.0	+12.9,-2.3	+0.2,-0.2	+2.6,-2.2	+0.0,-3.5	+26.5,-16.7
¹⁷ F	0.03	+25.0,-25.0	+12.9,-2.3	+0.2,-0.2	+2.6,-2.2	+0.0,-3.5	+28.3,-25.4	0.02	+25.0,-25.0	+12.9,-2.3	+0.2,-0.2	+2.6,-2.2	+0.0,-3.5	+28.3,-25.4
⁸ B	4.91	+10.1,-10.1	+31.8,-14.4	+0.4,-0.4	+5.5,-5.4	+0.0,-3.4	+33.8,-18.7	3.90	+10.1,-10.1	+31.8,-14.4	+0.4,-0.4	+5.5,-5.4	+0.0,-3.4	+33.8,-18.7
<i>hep</i>	0.02	+15.4,-15.4	+32.7,-15.4	+0.2,-0.2	+6.3,-6.1	+0.0,-3.5	+36.7,-22.9	0.02	+15.4,-15.4	+32.7,-15.4	+0.2,-0.2	+6.3,-6.1	+0.0,-3.5	+36.7,-22.9
Total	66.58	+1.7,-1.7	+3.4,-1.8	+0.1,-0.1	+2.0,-1.8	+0.0,-2.4	+4.3,-3.9	63.32	+1.6,-1.6	+3.1,-1.8	+0.0,-0.0	+2.0,-1.8	+0.0,-2.5	+4.1,-3.9

SAGE + GALLEX/GNO → 66.1 ± 3.1 SNU

Excellent agreement

THE pp NEUTRINO FLUX

$$[pp+{}^7\text{Be}+\text{CNO}+pep+{}^8\text{B}|\text{Ga}] = 66.1 \pm 3.1 \text{ SNU}$$

from 289 solar neutrino extractions in the SAGE and GALLEX/GNO experiments

$$[{}^7\text{Be}|\text{Borexino}] = (5.18 \pm 0.51) \times 10^9 \text{ } \nu_e/(\text{cm}^2 \text{ s}) \rightarrow [{}^7\text{Be}|\text{Ga}] = 19.1^{+2.3}_{-2.1} \text{ SNU}$$

$$[{}^8\text{B}|\text{SNO}] = (1.67 \pm 0.08) \times 10^6 \text{ } \nu_e/(\text{cm}^2 \text{ s}) \rightarrow [{}^8\text{B}|\text{Ga}] = 3.6^{+1.2}_{-0.6} \text{ SNU}$$

$$[pp+\text{CNO}+pep|\text{Ga}] = 43.3^{+3.8}_{-4.1} \text{ SNU}$$

$$[{}^7\text{Be}+\text{CNO}+pep+{}^8\text{B}|\text{Cl}] = 2.56 \pm 0.23 \text{ SNU}$$

$$[{}^7\text{Be}|\text{Cl}] = 0.67 \pm 0.07 \text{ SNU} \quad [{}^8\text{B}|\text{Cl}] = 1.73 \pm 0.12 \text{ SNU} \rightarrow$$

$$[\text{CNO}+pep|\text{Cl}] = 0.16^{+0.26}_{-0.16} \text{ SNU}$$

$$[\text{CNO}+pep|\text{Ga}] = 3.44^{+3.4}_{-3.4} \text{ SNU}$$

$$[pp|\text{Ga}] = [pp+\text{CNO}+pep|\text{Ga}] - [\text{CNO}+pep|\text{Ga}] = 39.9 \pm 5.2 \text{ SNU} \rightarrow$$

the measured electron neutrino pp flux at Earth of $(3.40^{+0.44}_{-0.48}) \times 10^{10}/(\text{cm}^2 \text{ s})$

$$(3.40^{+0.44}_{-0.48}) \times 10^{10}/(\text{cm}^2 \text{ s}) \times (\langle P_i^{ee} \rangle = 0.56 \left(1^{+0.030}_{-0.045} \right)) = (6.1 \pm 0.85) \times 10^{10}/(\text{cm}^2 \text{ s}) -$$

pp flux produced in the Sun

$$pp \text{ flux from the two recent SSM: } (5.97 \pm 0.05) \times 10^{10}/(\text{cm}^2 \text{ s}) \text{ (GS98)}$$

$$(6.04 \pm 0.05) \times 10^{10}/(\text{cm}^2 \text{ s}) \text{ (AGS05)}$$



*НИИЯФ МГУ,
март 2009 г.,
Москва*

**БНО ИЯИ РАН
В.Н. Гаврин**



Эксперименты с искусственными источниками нейтрино

TAUP

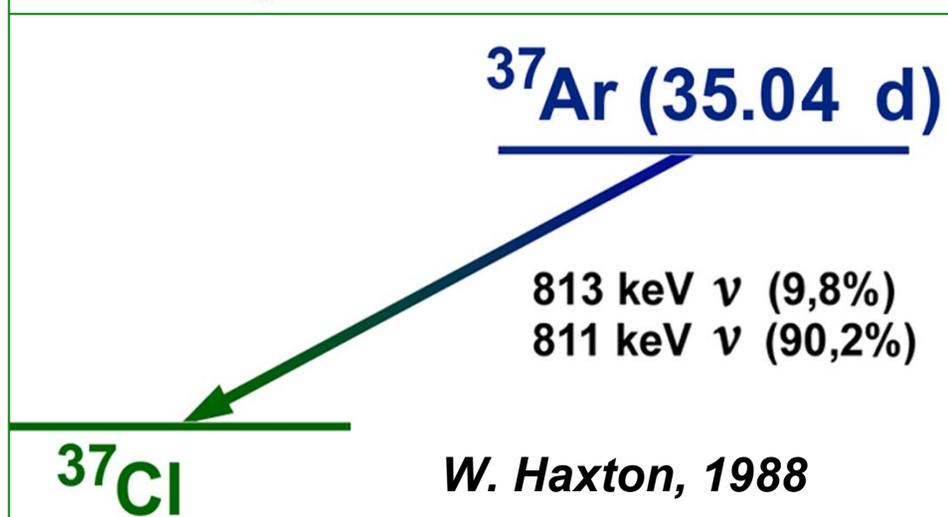
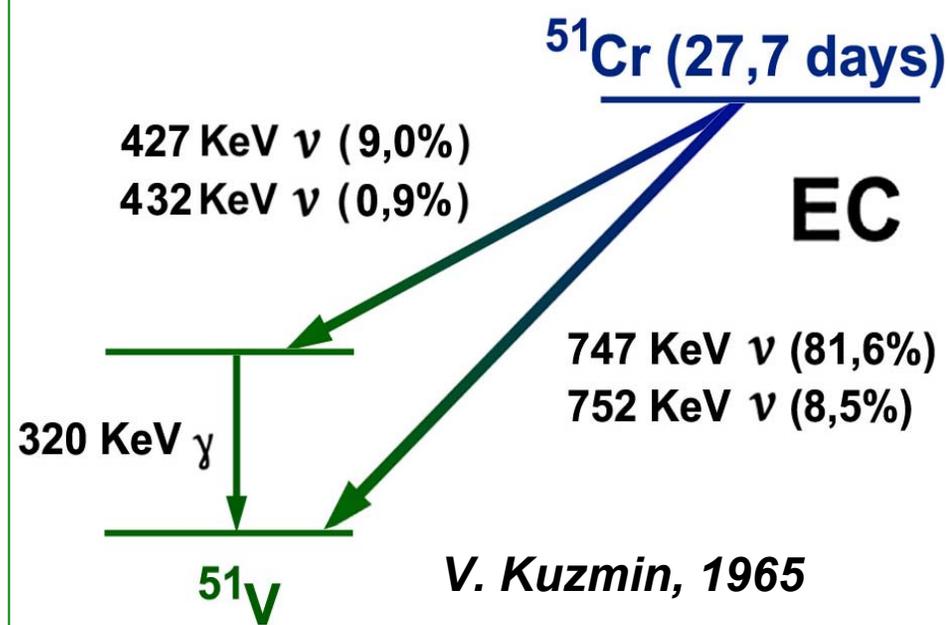
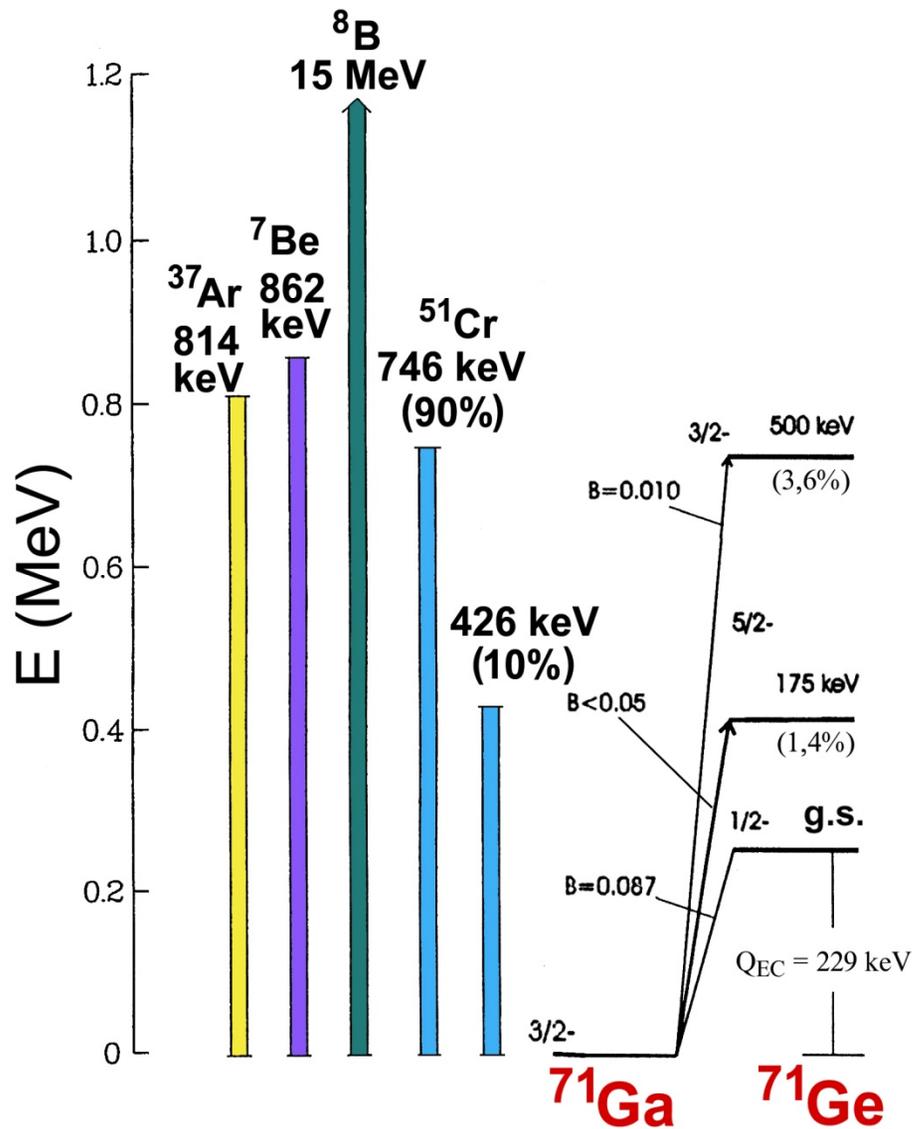
2007

Sendai

September 11 - 15, 2007



V.N.Gavrin
BNO INR RAS



⁵¹Cr

Gallium chloride solution (GALLEX)

Gallium metal (SAGE)

	(1)	(2)	
m_{Ga} (tons)	30.4	30.4	13.1
$m_{\text{of target}}$ (kg)	35,5	35,5	0,513
enrichment (% ⁵⁰ Cr)	38,6	38,6	92,4
source specific activity (KCi/g)	0,048	0,052	1,01
source activity (MCi)	1,71	1,87	0,52
expected rate	11,7	12,7	14,0

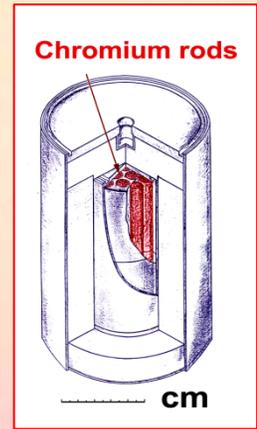
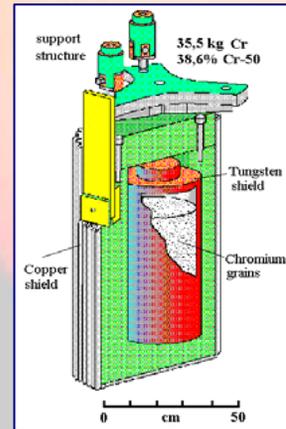
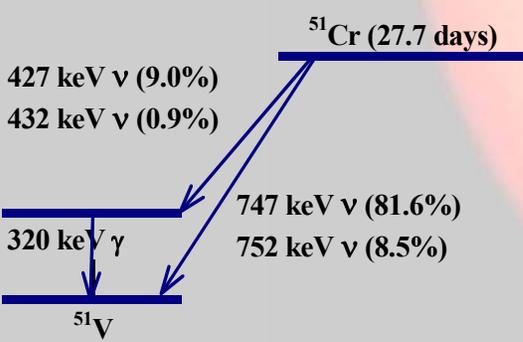
Weighted average

0.93±0.07

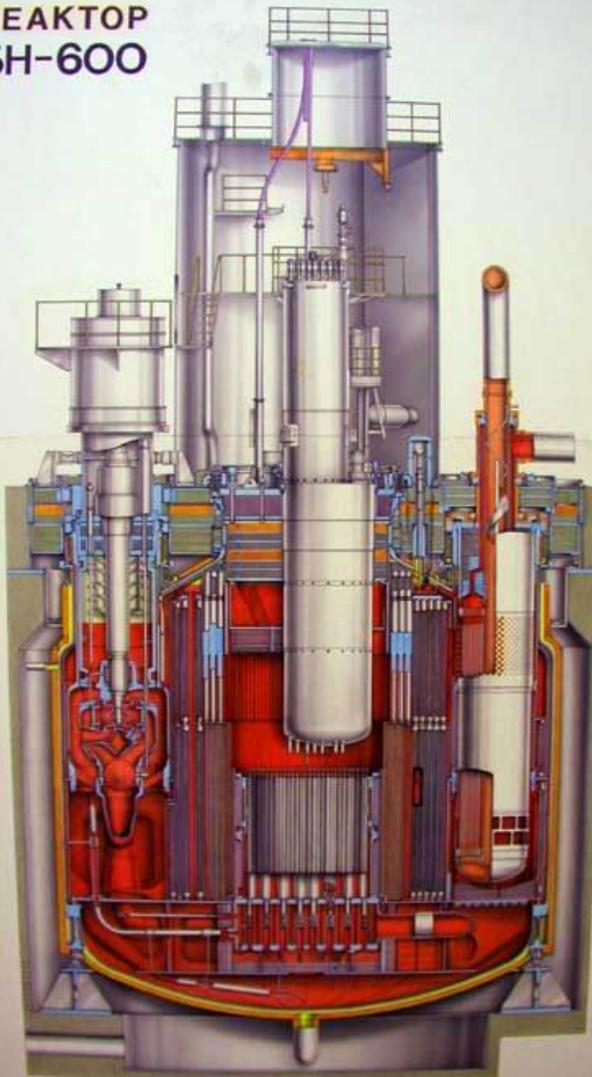
$R = p_{\text{measured}}/p_{\text{predicted}}$

1.0 ± 0.12	0.84 ± 0.12	0.95 ± 0.12
----------------	-----------------	-----------------

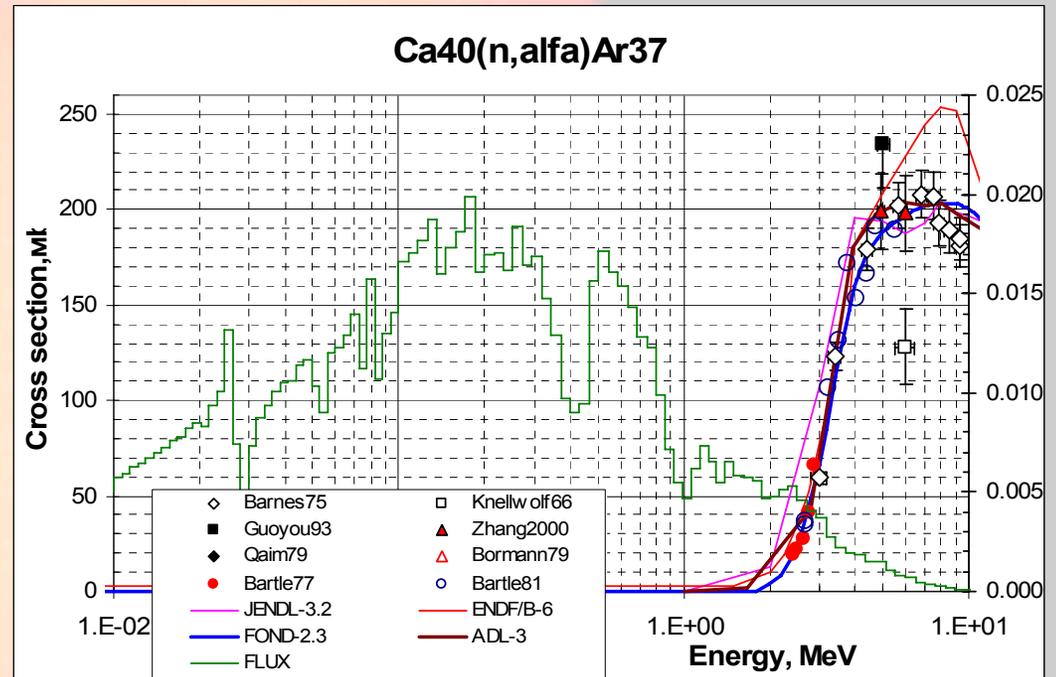
$R_{\text{combined}} = 0.93 \pm 0.08$ (PLB.1998)



PEAKTOP
BH-600

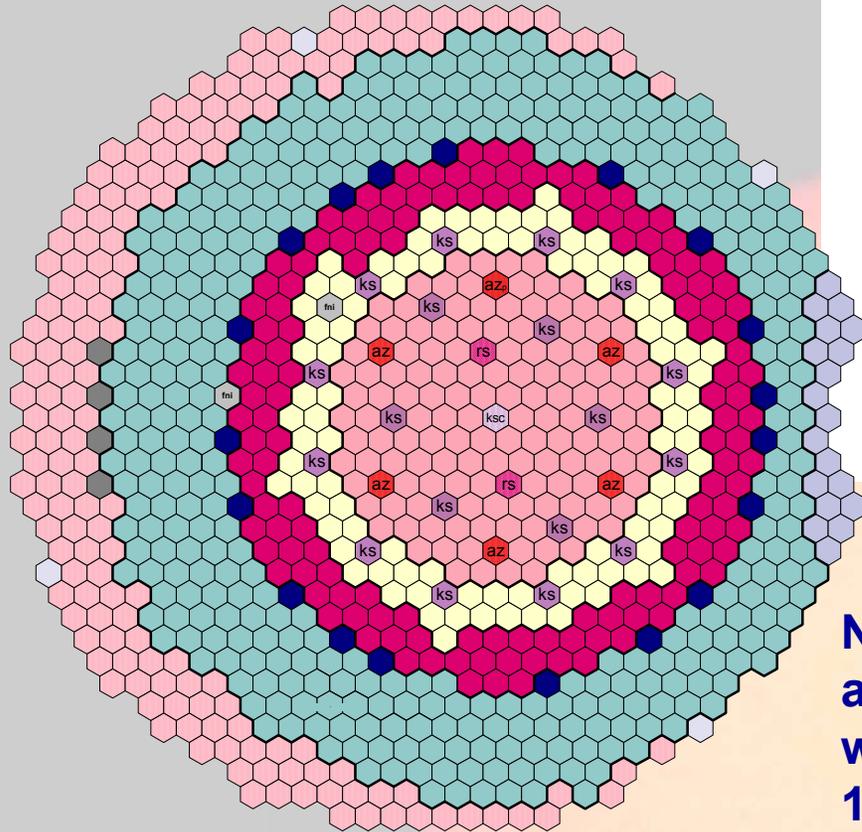


³⁷Ar production cross-section



The total fast flux at this reactor is $2.3 \cdot 10^{15}$ neutrons/(cm² · s), of which $1,7 \cdot 10^{14}$ neutrons/(cm² · s) have energy above the 2 MeV threshold of the production reaction ⁴⁰Ca (n, α) ³⁷Ar.

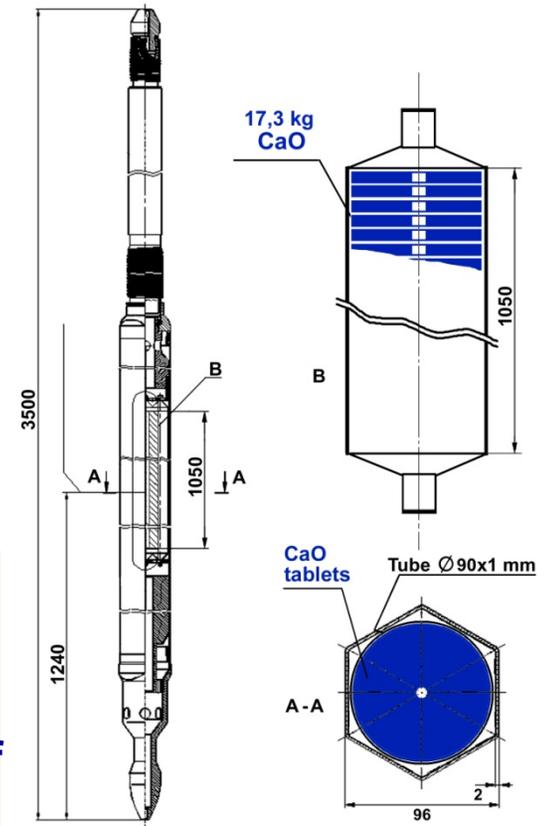
Map of BN-600 Reactor



- low enrichment zone
- middle enrichment zone
- high enrichment zone
- side blanket
- storage assemblies
- control rod steel box
- steel assemblies
- CaO assemblies

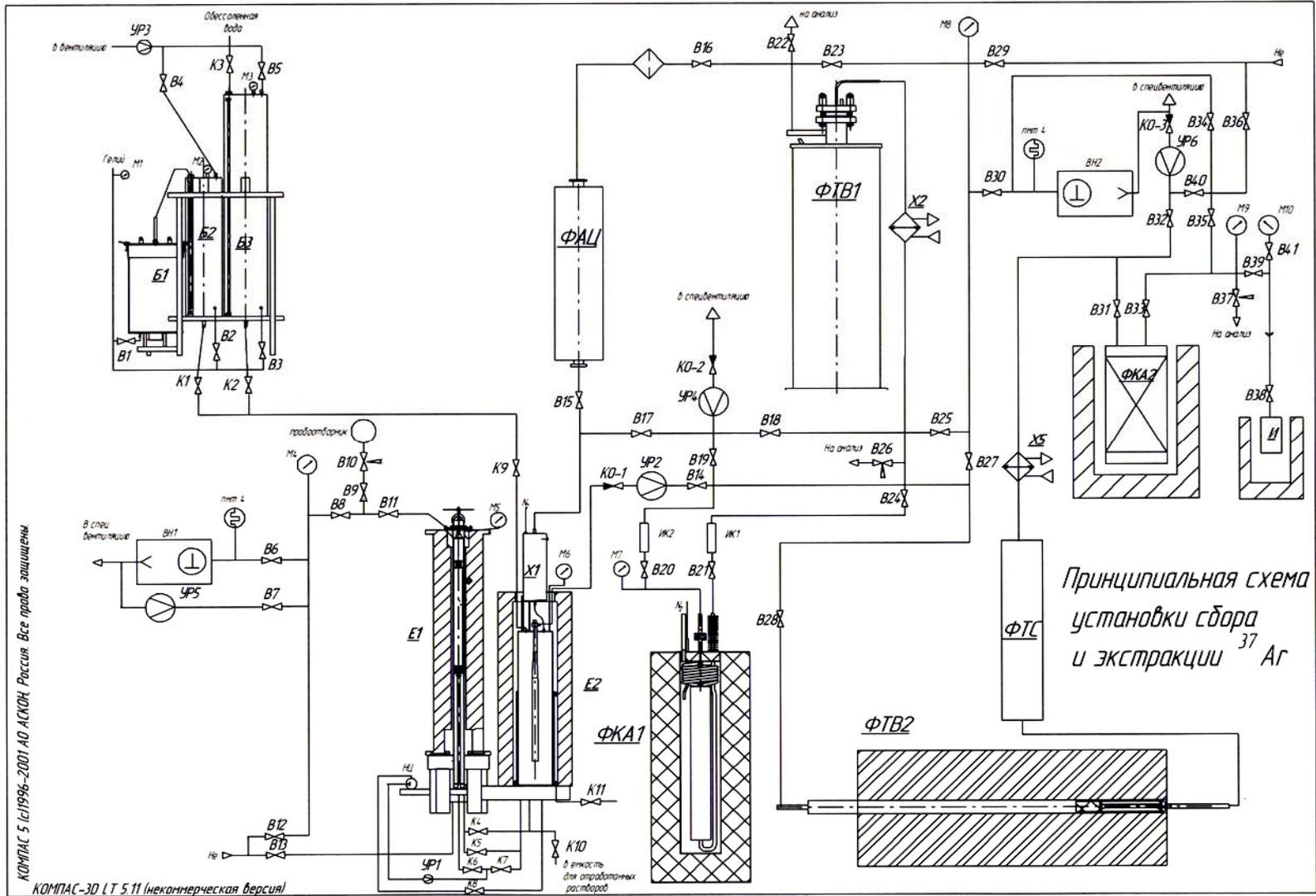
Nineteen irradiation assemblies, each of which contained 17.3 kg of CaO (12.36 kg Ca), were placed in the blanket zone of the reactor.

Irradiation Device



Irradiation began on 31 October 2003 and continued until 12 April 2004, the normal reactor operating cycle. After a cooling period of a week, the assemblies were removed from the reactor and moved to a hot cell of BNPP where ampoules with irradiated target were taken out from assemblies and moved to extraction facility of the Institute of Nuclear Materials, where each ampoule was cut open in a vacuum system and the CaO dissolved in nitric acid.

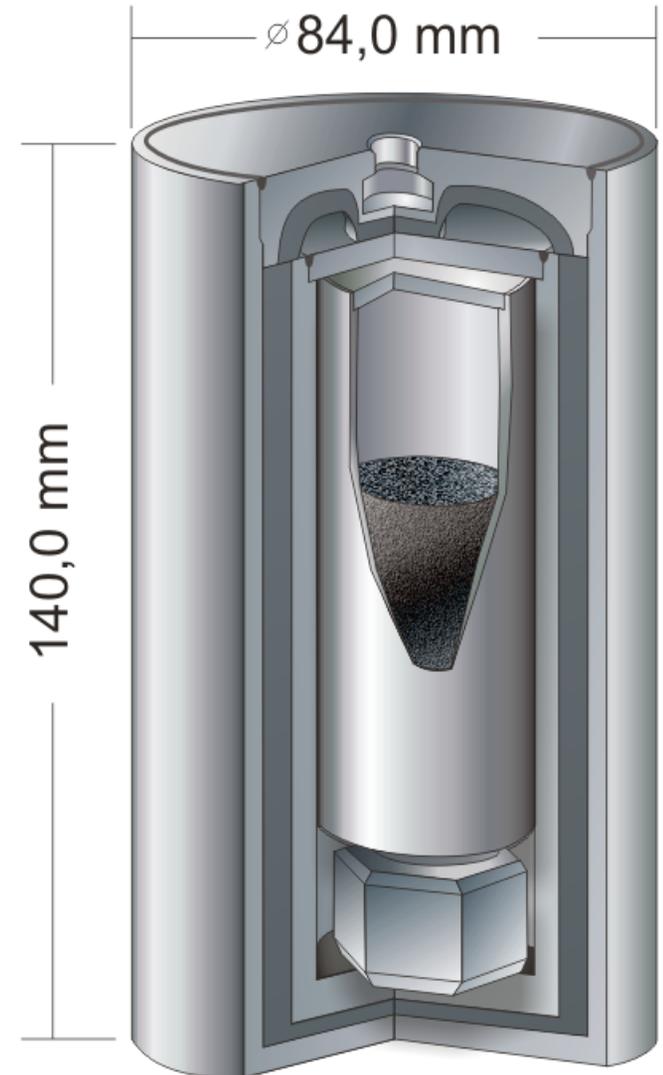
^{37}Ar was extracted from acid solution by a He purge and then stored on charcoal at LN2 temperature.



When the extractions from all the assemblies had been completed, the ^{37}Ar was purified by flowing over zeolite at room temperature, followed by two Ti absorbers, operating at 400-450°C and 900-950°C. The purified ^{37}Ar , whose volume was ~ 2.5 l, was then adsorbed on another charcoal trap and measurements of gas volume and



As the last steps of source fabrication, the purified Ar was transferred to a pre-weighed source holder, which consisted of a stainless steel vessel with a volume of ~180 ml. Inside this vessel was 40 g of activated charcoal onto which the purified ^{37}Ar was cryopumped. When essentially all the ^{37}Ar had been adsorbed, the vessel was closed by compressing three separate knife-edge seals, two onto copper gaskets and one onto a lead gasket. The source holder was then weighed to determine the amount of ^{37}Ar contained within. To complete the source, the source holder was placed within two concentric stainless steel vessels with a Pb shield between them. These two vessels were welded shut and the heat output of the finished source was measured with a calorimeter. These procedures were completed on 29 April and the source was immediately flown by chartered plane to the Mineral Water airport, close to the experimental facility at the Baksan Neutrino

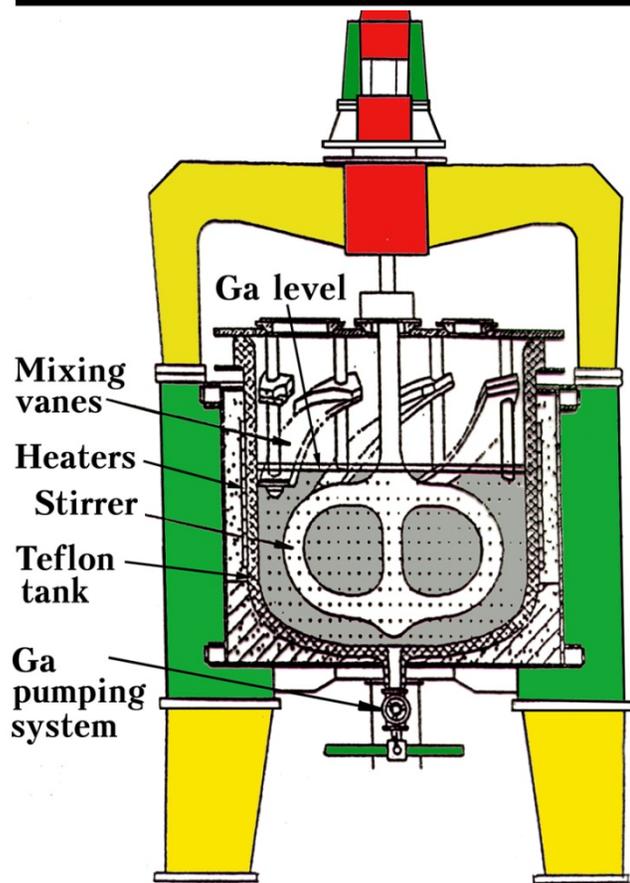
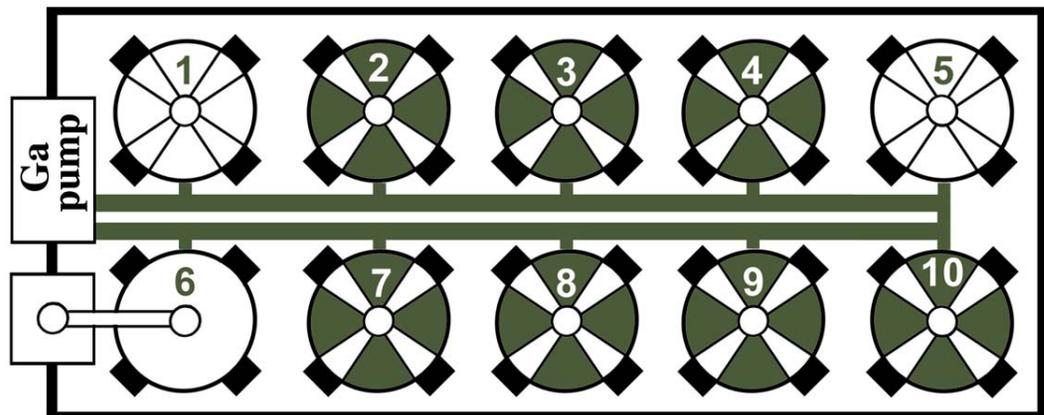




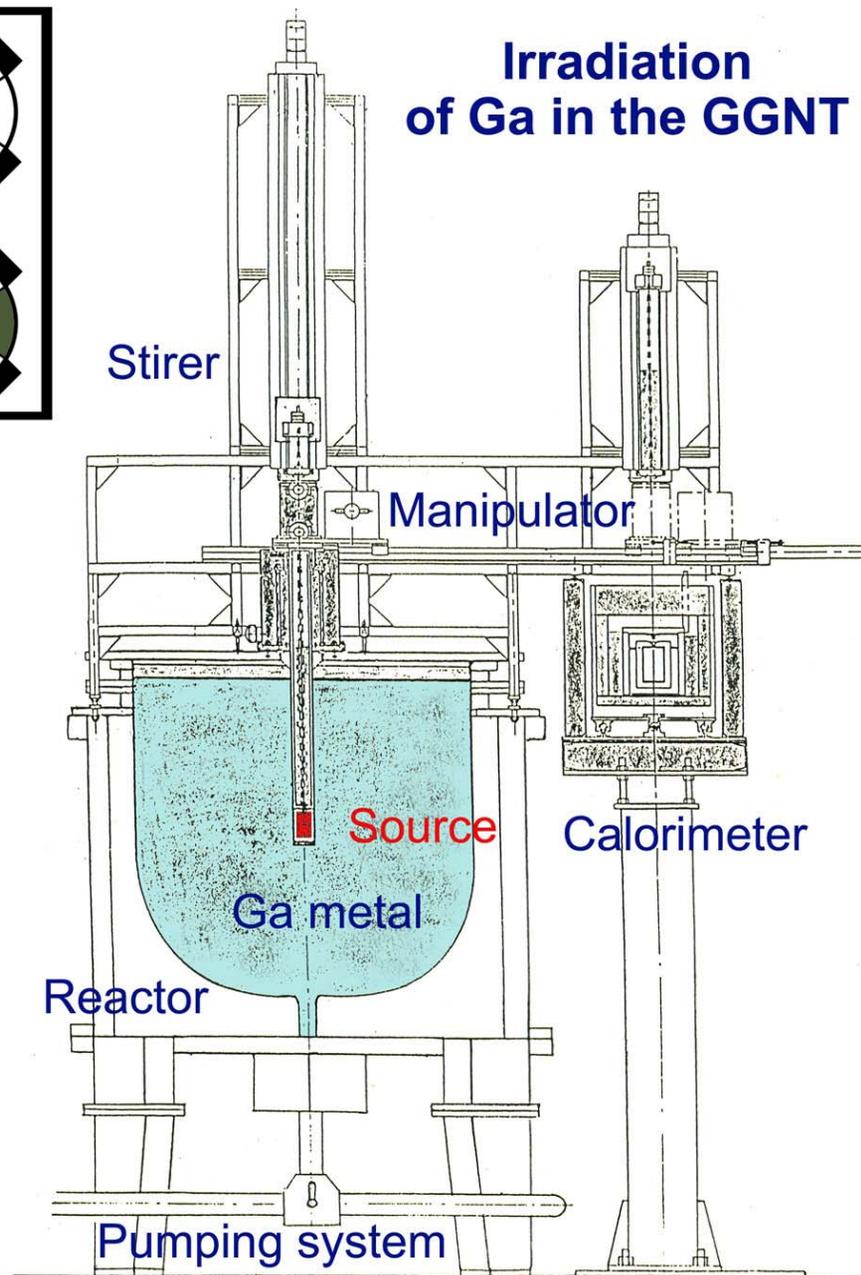




План расположения реакторов



Irradiation of Ga in the GGNT



⁵¹Cr

**Gallium chloride solution
(GALLEX)**

³⁷Ar

Gallium metal (SAGE)

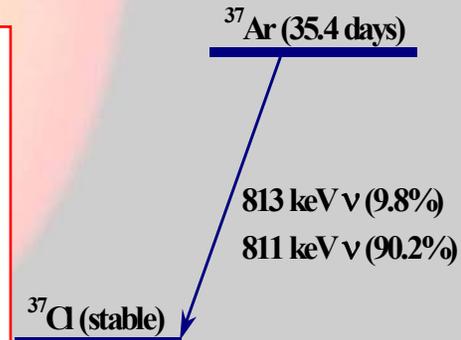
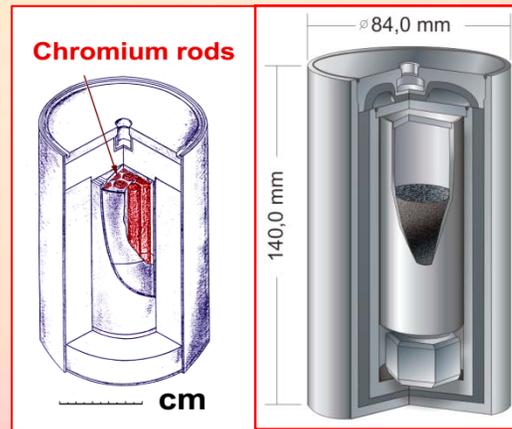
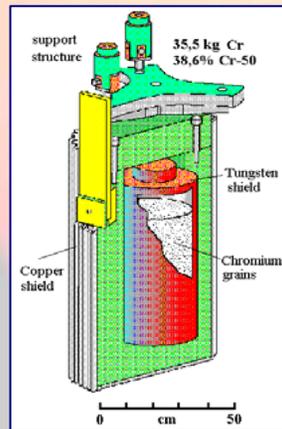
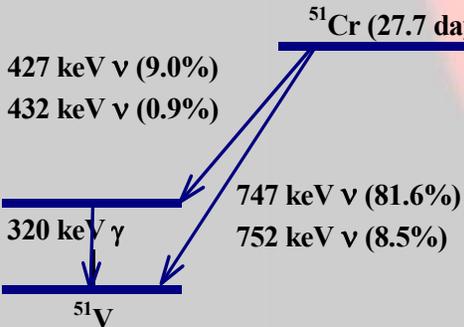
	(1)	(2)		
m_{Ga} (tons)	30.4	30.4	13.1	13.1
$m_{of\ target}$ (kg)	35,5	35,5	0,513	330
enrichment (% ⁵⁰ Cr)	38,6	38,6	92,4	96,94% ⁴⁰ Ca (natural Ca)
source specific activity (KCi/g)	0,048	0,052	1,01	92,7
source activity (MCi)	1,71	1,87	0,52	0,41
expected rate	11,7	12,7	14,0	13,9
$R = p_{measured}/p_{predicted}$	0.95±0.11	0.81±0.11	0.95±0.12	0.79±0.10

R_{combined}

0.88±0.08

(F. Kaether, Ph. D. thesis, 2007)

0.86±0.08



Без вклада нижних уровней

0.93 ± 0.05

GALLEX
 ^{71}As эксперимент!

**Weighted
average**

Включая вклад нижних уровней

0.87 ± 0.05

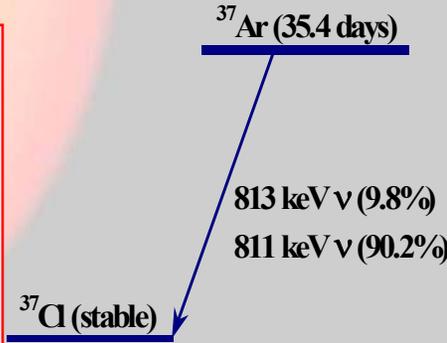
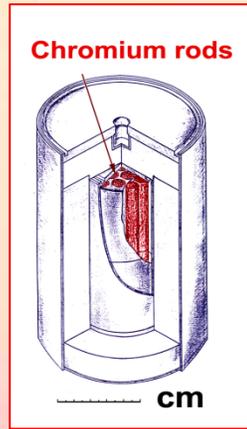
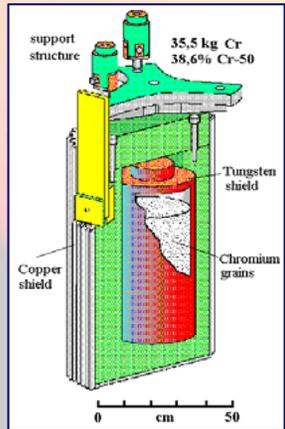
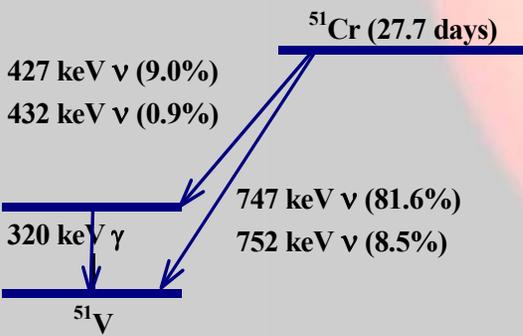
$R = p_{\text{measured}} / p_{\text{predicted}}$

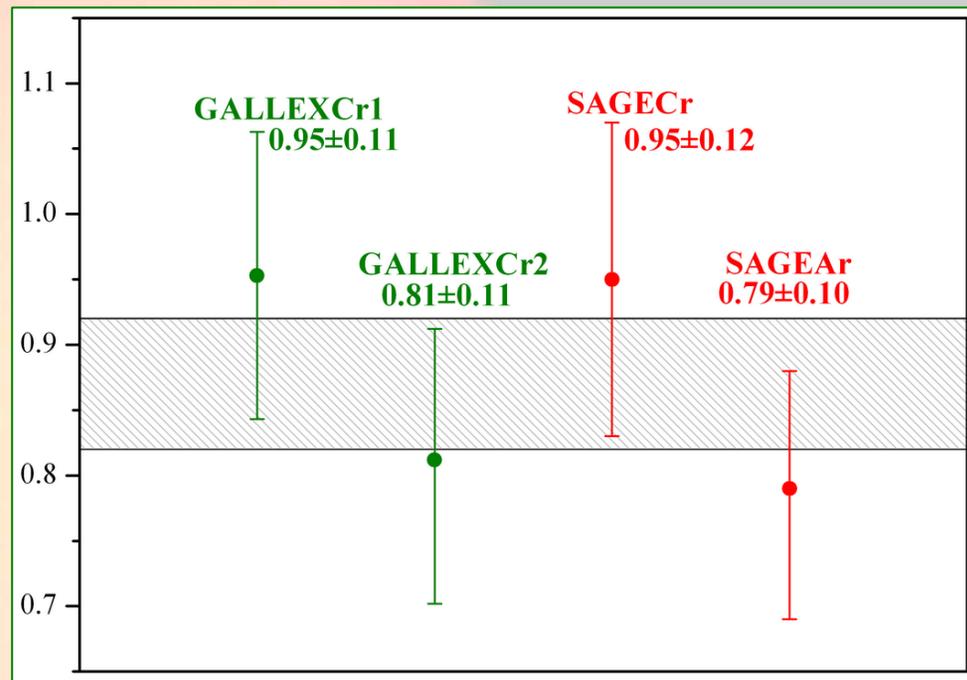
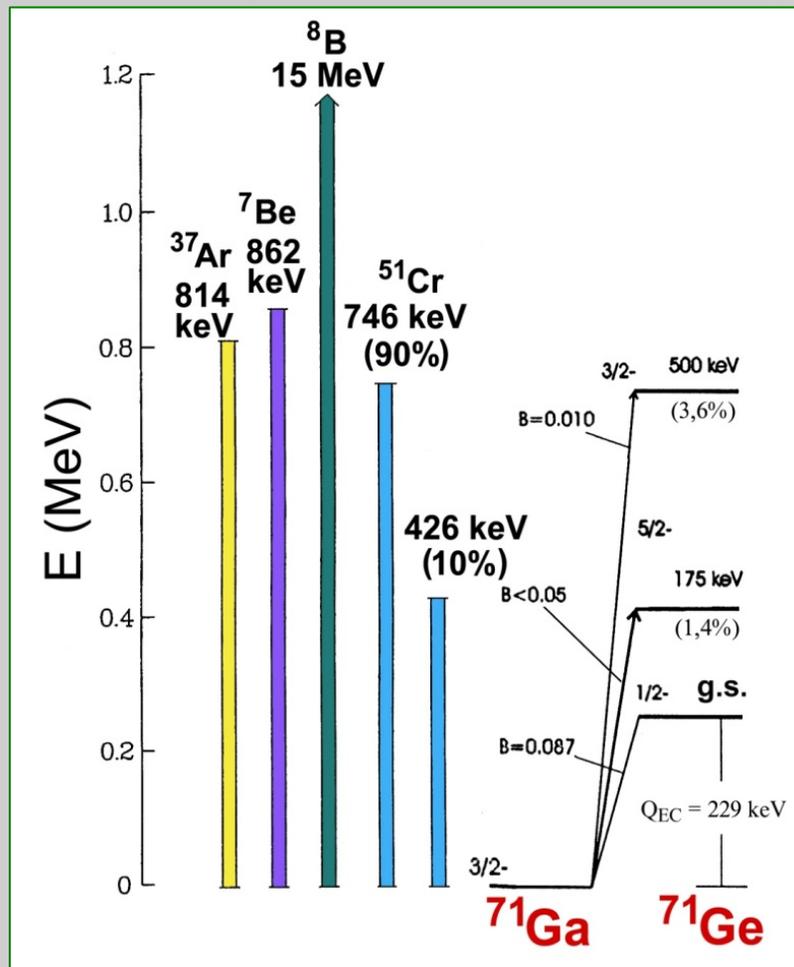
0.95 ± 0.11 0.81 ± 0.11 0.95 ± 0.12 0.79 ± 0.10

R_{combined}

0.88 ± 0.08

0.86 ± 0.08





Эксперименты с источниками на Ga

* Средневзвешенная величина R составляет 0.88 ± 0.05 , более чем на два стандартных отклонения меньше единицы. Если вклад двух нижних уровней ^{71}Ge положить равным 0, тогда $R = 0.93 \pm 0.05$, что достаточно хорошо согласуется с единицей.

* Совместный анализ результатов с искусственными источниками на Ga указывает на то, что предсказываемая скорость захвата завышена.

* Наиболее вероятная гипотеза – сечение для захвата нейтрино на двух нижних возбужденных уровнях ^{71}Ge дают пренебрежимо малый вклад.

* Но существуют и альтернативные объяснения, основанные на переходах в стерильные нейтрино или на квантовой декогеренции в нейтринных осцилляциях.

C. Giunti and M. Laveder, Mod. Phys. Lett. A 22, 2499 (2007) [[arXiv.org/abs/hep-ph/0610352](https://arxiv.org/abs/hep-ph/0610352)].

Y. Farzan, T. Schwetz, and A. Yu Smirnov [[arXiv.org/abs/0805.2098](https://arxiv.org/abs/0805.2098)].

Что известно о поперечном сечении захвата нейтрино на 175 кэВ и 500 кэВ уровни ^{71}Ge

– *John Bahcall в 1985 вывел величину сечения, основываясь на результатах измерений (p, n) рассеяния на ^{71}Ga , выполненных на циклотроне Университета Индианы (IUC), ($E_p = 120$ МэВ и 200 МэВ)*

В силу очень плохого разрешения ($\sim 300\%$) для перехода на уровень 175 кэВ был получен только верхний предел для $B(GT)$ фактора, а в измерениях для переходов на уровень 500 кэВ неопределенность достигала 50%

– *Hiro Ejiri, начиная с 1995 года изучал эти переходы, используя реакцию ($^3\text{He}, t$) в RCNP (Япония, Осака)*

Результаты измерений Ejiri', как и ожидаемые скорости захвата на эти уровни, значительно отличаются от полученных Баккалом

Measurement of the solar neutrino capture rate with gallium metal.

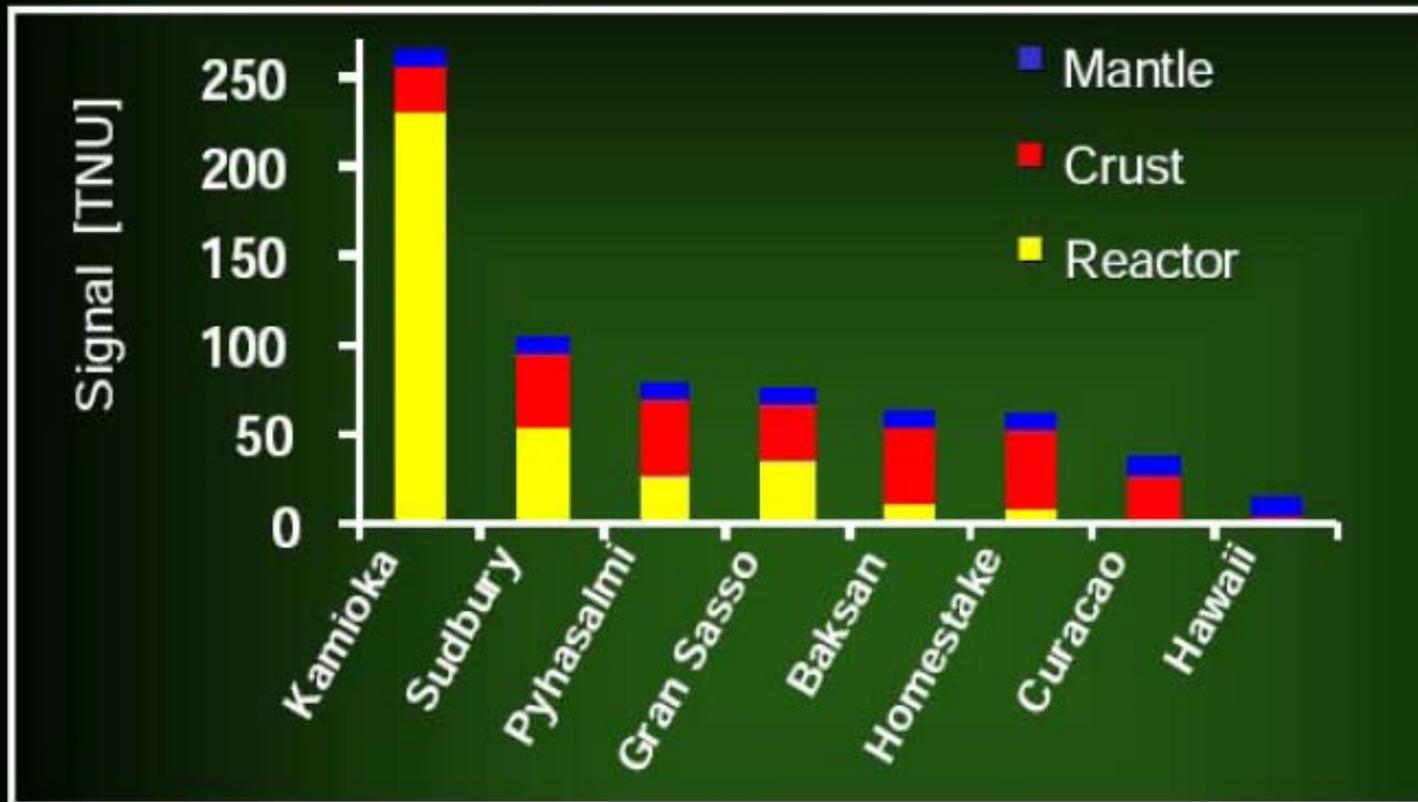


- 168 runs for 18 year period (Jan 1990 – Dec 2007) give the result: $65.4^{+4.0}_{-4.1}$ SNU
 1 SNU = 1 neutrino capture/sec in a target that contains 10^{36} atoms of the neutrino absorbing isotope
 CCM = 128^{+9}_{-7} SNU (without oscillations).
- There is good agreement between SSM prediction including neutrino oscillations and **SAGE** result.
- The recent test of **SAGE** with a reactor-produced ${}^{37}\text{Ar}$ neutrino source shown that SSM predicted rate may be overestimated. (Although there are alternative explanations based on transitions to sterile neutrinos or on quantum decoherence in neutrino oscillations.)
- A new test of **SAGE** is planned with a reactor-produced very intense neutrino source to shed light on this question.
- **SAGE** is currently the only operating solar neutrino experiment which provides the determination of the fundamental *pp* neutrino flux and a continuous monitoring of the low energy solar neutrino flux with increasing sensitivity over very long time period.

Ближайшие планы SAGE:

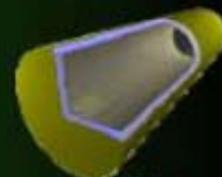
- экспериментальные работы по определению Gamow-Teller фактора для переходов из основного состояния ^{71}Ga на нижние возбужденные уровни ^{71}Ge
- независимые измерения объединенного эффекта этих переходов на Ga с использованием высокоинтенсивного (около 2 МКи) источника ^{37}Ar или ^{51}Cr
- продолжение ежемесячных измерений потока солнечных нейтрино на ГГНТ

Running and planned experiments



- Several experiments, either running or under construction or planned, have geo- ν among their goals.

- Figure shows the sensitivity to geo-neutrinos from **crust** and **mantle** together with **reactor** background.



Планы БНО:

Модернизация БПСТ

- *Новая электроника*
- *Наращивание мишени для повышения вероятности регистрации сверхновой.*

Долгосрочные планы:

Новые крупномасштабные сцинтилляционные детекторы

Гео и СН антинейтрино

~ 5 кт, энергия ν 1÷50 МэВ.

Солнечные и СН нейтрино

~ 1 кт, энергия ν 0.5÷20 МэВ.

Распад протона и атмосферные нейтрино

~ 100 кт, энергия ν >50 ГэВ.



26.07-02.08, 2006

V.N. Gavrin
INR RAS

2

Stage of R&D

 CC exp. (ν_e only)

 ν_e scattering
exp. ($\nu_e + \alpha(\nu_\mu + \nu_\tau)$)

 proposed

experiment	reaction	detector
LENS	$\nu_e \text{ } ^{115}\text{In} \rightarrow \text{}^{115}\text{Sn}, e, \gamma$	60 tons In-loaded scintillator (pp, ^7Be)
MOON	$\nu_e \text{ } ^{100}\text{Mo} \rightarrow e \text{ } ^{100}\text{Tc}(\beta)$	3,3 ton ^{100}Mo foil + plastic scintillator (pp, ^7Be)
Lithium	$\nu_e \text{ } ^7\text{Li} \rightarrow e \text{ } ^7\text{Be}$	Radiochemical, 10 ton lithium
CLEAN	$\nu_e \rightarrow \nu_e^-$	10 ton Liquid Ne (pp, ^7Be)
XMASS	$\nu_e \rightarrow \nu_e^-$	10 ton Liquid Xe (pp, ^7Be)
HERON	$\nu_e \rightarrow \nu_e^-$	10 ton super-fluid He (pp, ^7Be)
TPC type	$\nu_e \rightarrow \nu_e^-$	Tracking electron in gas target (pp, ^7Be)
SNO	$\nu_e \rightarrow \nu_e^-$	1000 ton Liquid scintillator (pep, ^7Be , CNO)
LENA	$\nu_e \rightarrow \nu_e^-$	50,000 ton Liquid scintillator Ne (pp, ^7Be , CNO, ^8B)

Лаборатория низкофоновых исследований БНО ИЯИ РАН

Проводятся ряд экспериментов с целью поиска очень редких ядерных распадов и электро-слабых процессов:

- Проверка закона сохранения электрического заряда;
- Проверка постоянства интенсивности космических лучей в прошлом;
- Поиск сверхплотных ядер;
- Поиск двойного бета-распада различных изотопов: ^{76}Ge , ^{100}Mo , ^{150}Nd , ^{96}Zr , ^{58}Ni , ^{130}Te и ^{136}Xe с использованием различных методов детектирования:
 - полупроводниковых германиевых детекторов большого объема;
 - многодетекторных систем на основе сцинтилляторов;
 - ионизационных камер высокого давления;
 - больших пропорциональных счетчиков высокого давления.
- Поиск частиц - кандидатов на темную массу Вселенной.

Результаты:

Получен предел $T \geq 2 \times 10^{23}$ лет для распада электрона с испусканием трех и более нейтрино, который является рекордным до настоящего времени.

Наибольший прогресс был достигнут в эксперименте по поиску безнейтринного двойного бета-распада ^{76}Ge , IGEX (Россия - США - Испания). На HPGe-76 детекторе массой 1 кг был достигнут рекордно низкий уровень фона **0,04 отсчета/кэВ×год×кг** в области ожидаемого пика от безнейтринного распада (2038 кэВ), что позволило получить ограничение на массу майорановского нейтрино порядка 1 эВ только на одном детекторе за время около полугода.

Рекордно низкий энергетический порог регистрации 1,5 кэВ был достигнут для одного из 1кг HPGe детекторов, что в сочетании с ультранизким фоном дает возможность значительно расширить границы запрещенных областей для масс и сечений взаимодействия частиц - кандидатов на роль Скрытой массы

В бета-спектре ядра ^{14}C с помощью бесстеночного пропорционального счетчика высокого давления проведен поиск примеси "тяжелого" ν с массой 17 кэВ. На основе сравнения формы измеренного β - спектра ^{14}C с расчетной формой β - спектра для разрешенных переходов был установлен один из лучших пределов на примесь 17 кэВ ν : $\sin^2 \Theta \leq 0,0022$ (90% у.д.)

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ БАКСАНСКОГО ТЕЛЕСКОПА

- Измерен поток мюонов, рожденных нейтрино космических лучей, и получены ограничения на параметры осцилляций нейтрино;

$$\begin{aligned} \nu_\mu \rightarrow \nu_\tau \\ \Delta m^2 \leq 2.73 \cdot 10^4 \text{ eV}^2 \text{ при } \sin^2 2\Theta_V = 1 \\ \sin^2 2\Theta_V \geq 0.23 \text{ при } \Delta m^2 \geq 3.2 \cdot 10^2 \text{ eV}^2 \\ \nu_\mu \rightarrow \nu_e \\ \Delta m^2 \leq 3.1 \cdot 10^3 \text{ eV}^2 \text{ при } \sin^2 2\Theta_V = 1 \\ \sin^2 2\Theta_V \leq 0.08 \text{ при } \Delta m^2 \geq 3.63 \cdot 10^2 \text{ eV}^2. \\ I_\mu^j = (2.45 \div 2.75) \cdot 10^{-13} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1} \end{aligned}$$

- Получены ограничения на поток нейтрино высоких энергий от локальных источников, поток мюонов от нейтрино, из плоскости Галактики: $F_\nu \leq 4 * 10^{-14} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$.

- Получено наилучшее в мире ограничение на поток медленных ($2 * 10^{-4} \leq v/c < 10^{-1}$) тяжелых магнитных монополей: $P \leq 5.5 * 10^{-16} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$.

- Измерена амплитуда $(12,3 \pm 2) * 10^{-4}$ и фаза $(1,6 \pm 0,8)$ первой гармоники анизотропии в звездном времени.

- Получены следующие ограничения на частоту нейтринных всплесков от гравитационного коллапса звезд в Галактике f и средний интервал между вспышками сверхновых T (на 90% д.у.): $f < 0.177 \text{ год}^{-1}$, $T > 5.65 \text{ лет}$;

- Исследовалась стабильность протона в ядрах вещества; полученное ограничение на время жизни протона: $-T > 0,9 * 10^{31} \text{ лет}$.

•- Измерен поток высокоэнергичных нейтронов, генерируемый мюонами в скальном грунте:

• $P_n \leq (3.8 \pm 0.5) * 10^{-8} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

•- Разработан и реализован в эксперименте метод разделения адронных и электромагнитных каскадов, основанный на регистрации π - μ - e -распадов, сопровождающих каскад.

•- Измерено полное сечение адронного фотопоглощения до энергий фотонов 10 ТэВ; полученные результаты согласуются с предсказаниями недиагональной обобщенной модели векторной доминантности.

•- Данные по измерению химического состава первичных космических лучей с энергиями 10^{12} - 10^{16} эВ хорошо согласуются с результатами прямых измерений при более низких (10^{12} эВ) энергиях.

A little history

1930 W. Pauli proposed the existence of a neutral particle of low mass as “*a desperate way out*”.

1934 E. Fermi renamed Pauli's particle as the "neutrino" and had incorporated the particle into a theory of β -decay.

Bethe + Peierls calculate cross-section $\rightarrow 10^{-43} \text{ cm}^2 @ \text{ MeV}$

Pauli: “*I have invented something that cannot be detected*”

(It is obviously that he has underestimated ingenuities of the experimenters.)

1946 Pontecorvo shows that “observation of neutrinos is not out of question” and suggests for detection neutrino to use “inverse beta process” : $\nu + (A,Z) \rightarrow e^- + (A,Z+1)$

He suggested as the sources of ν the Sun and reactor or material from it. (“The neutrinos emitted by the sun, however, are not very energetic”).

Among the targets, considers ^{37}Cl as the most promising: $^{37}\text{Cl} + \nu \rightarrow ^{37}\text{Ar} + e^-$

Pontecorvo suggests to use the new high-gain, miniature, low background proportional counter.

These two his ideas are the basis of all radiochemical experiments.

Exactly those two ideas will be implemented by Davis.

1949 L. Alvarez considered Cl-Ar method of detecting ν in details and proposed an extended experiment of detecting the theoretically expected cross section for ν of $2 \times 10^{-45} \text{ cm}^2/\text{atom}$.

1956 F. Reines and C. Cowen detect ν from Savannah River reactor $p(\nu, e^+)n$

1960's Ray Davis builds Chlorine detector to measure the rate of reaction $^{37}\text{Cl}(\nu, e^-)^{37}\text{Ar}$

John Bahcall generates SSM & ν flux predictions “...to see into the interior of a star and thus verify directly the hypothesis of nuclear energy generation in stars...”

1965 V. Kuzmin proposed to use the reaction $^{71}\text{Ga}(\nu, e^-)^{71}\text{Ge}$ for solar ν detector and artificial ^{51}Cr neutrino source for it's calibration.

At that time main attention was concentrated on building of Davis' Chlorine experiment in Homestake mine. The Ga experiment was not practical - the world production of Ga was about 100 kg per year.



Бруно Понтекорво

available, so that the requirement is of importance in a neutrino experiment.

- 5. The background, (i.e., the production of element Z & A by other causes than the inverse β process), must be as small as possible.

An Example

“ The object of this note is to show that the experimental observation of an inverse process produced by neutrinos is not out of the question with the modern experimental facilities, and to suggest a method which might make an experimental observation feasible. ”

“ The neutrino flux from the sun is of the order of $10^{10} \text{cm}^{-2} \text{sec}^{-1}$. The neutrinos emitted by the sun, however, are not very energetic. The use of high intensity piles permits two possible strong neutrino sources. ”

Causes other than inverse β processes capable of producing the radio element looked for are:

- (a) (np) processes and Nuclear Explosions. The production of background by (np) process against the nucleus bombarded is zero, if the particular inverse β process selected involves the

CHALK R
 20 NOV

Извлечение германия из металлического галлия

Метод основан на избирательном окислении германия в металлическом галлии с помощью подкисленного раствора перекиси водорода

В состав ГГНТ входят десять химических реакторов, соединенных между собой обогреваемым фторопластовым трубопроводом с фторопластовым насосом

Эффективность извлечения германия зависит от большого числа параметров.

- Рост температуры реакции уменьшает эффективность процесса, реакцию начинают проводить при температуре $30.0 - 30.5^{\circ}\text{C}$.
- Эффективность процесса растет с увеличением количества добавляемого окислителя.
- С увеличением количества добавляемой перекиси водорода увеличивается количество растворяемого галлия.

Разработана методика, которая позволяет извлекать около 95% германия, растворяя при этом всего лишь 0.1% галлия.



Процедуры извлечения

- Извлечение германия из металлического галлия в водный раствор по реакции окисления.
- Концентрирование водного раствора:
 - а) Упаривание под вакуумом, объем раствора уменьшается в 8 раз.
 - б) Отдувка германия в виде тетрахлорида.
 - в) Улавливание тетрахлорида деионизованной водой в спец. ловушке.
 - с) Экстракция германия с последующей рекстракцией в 100 мл воды.
- Синтез газообразного соединения – моногермана (GeH_4), его очистка, измерение объема, заполнение пропорционального счетчика (~20% GeH_4 и ~80% Xe).

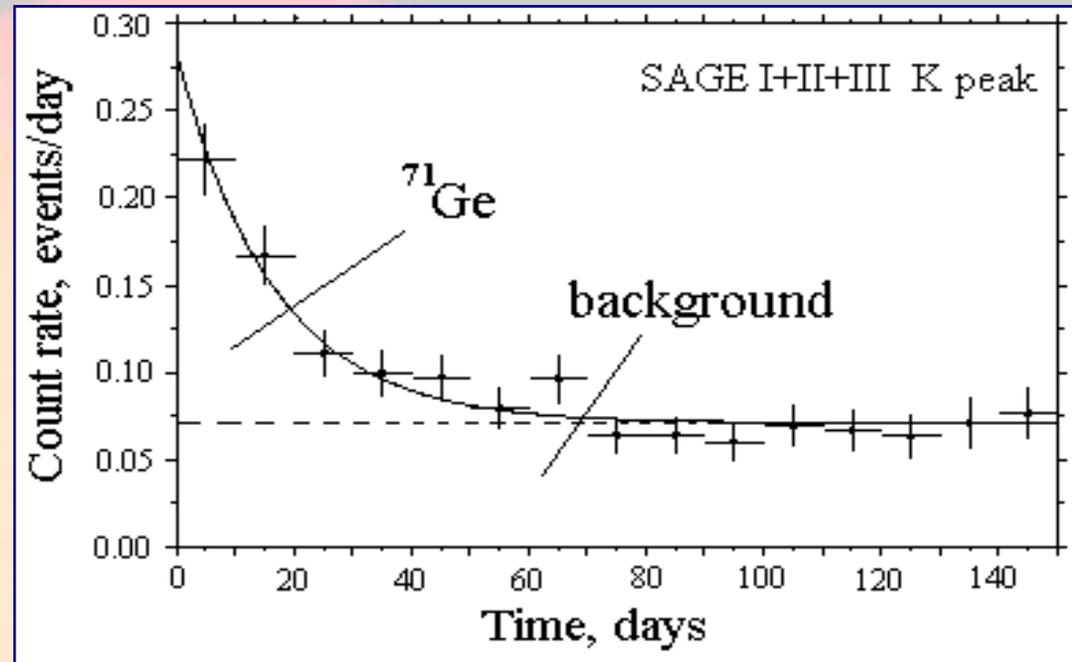
Средняя эффективность извлечения германия из металлического галлия:

до 1997 года ~ 77%.

после 1997 года ~ 95%.

Time analysis

Counting time
~ 5 months



Assumption:

background – flat time distribution

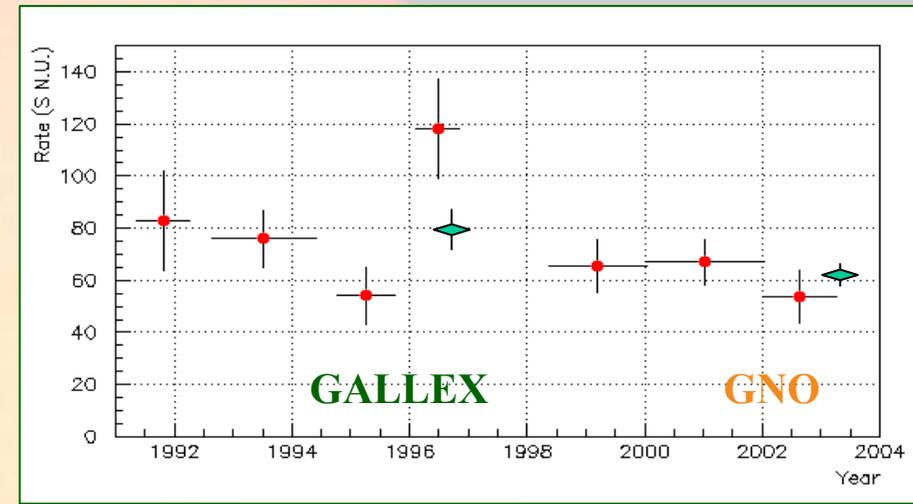
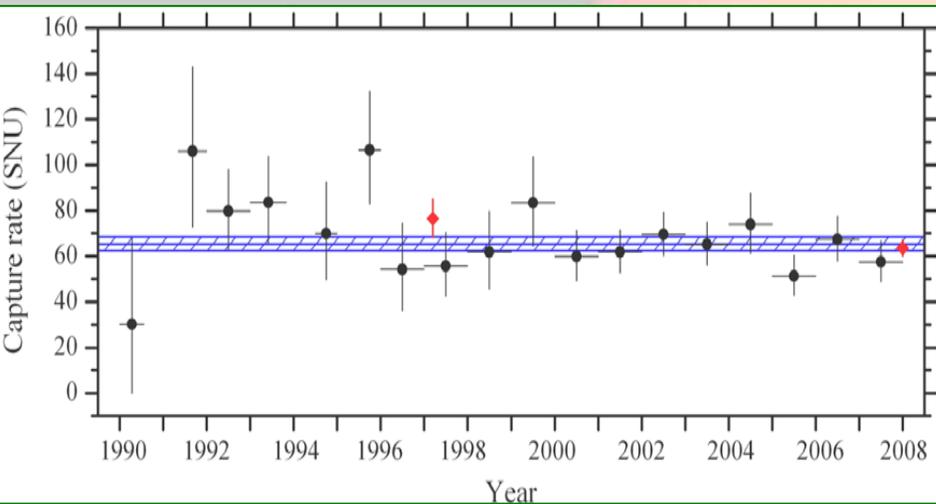
^{71}Ge – decays with $T_{1/2} = 11.43 \text{ d}$



НИИЯФ МГУ,
март 2009 г.,
Москва



БНО ИЯИ РАН
В.Н. Гаврин





$$\begin{pmatrix} \mathbf{v}_e \\ \mathbf{v}_\mu \\ \mathbf{v}_\tau \end{pmatrix} = U \begin{pmatrix} \mathbf{v}_1 \\ \mathbf{v}_2 \\ \mathbf{v}_3 \end{pmatrix}$$

e^- μ τ

\mathbf{v}_e \mathbf{v}_μ \mathbf{v}_τ

Using the oscillation framework for neutrino flavor change:

If neutrinos have mass:
$$|\nu_l\rangle = \sum U_{li} |\nu_i\rangle$$

For three neutrinos:

$$U_{li} = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu1} & U_{\mu2} & U_{\mu3} \\ U_{\tau1} & U_{\tau2} & U_{\tau3} \end{pmatrix}$$

Maki-Nakagawa-Sakata-Pontecorvo (MNSP) matrix

(Double β decay only)

$$= \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & e^{-i\delta} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & e^{-i\alpha_2/2} & 0 \\ 0 & 0 & e^{-i\alpha_3/2+i\delta} \end{pmatrix}$$

Solar, Reactor

Atmos., Accel.

CP Violating Phase

Reactor, Accel

Majorana Phases

where $c_{ij} = \cos \theta_{ij}$, and $s_{ij} = \sin \theta_{ij}$

Range defined for $\Delta m_{12}, \Delta m_{23}$

For **two neutrino** oscillation in a vacuum: (valid approximation in many cases)

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = \sin^2 2\theta \sin^2 \left(1.27 \frac{\Delta m^2 L}{E} \right)$$

Matter Effects – the MSW effect

$$i \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \nu_e \\ \nu_x \end{bmatrix} = H \begin{bmatrix} \nu_e \\ \nu_x \end{bmatrix} \quad (\text{Mikheyev, Smirnov, Wolfenstein})$$

$$H = \begin{bmatrix} -\frac{\Delta m^2}{4E} \cos 2\theta + \sqrt{2} G_F N_e & \frac{\Delta m^2}{4E} \sin 2\theta \\ \frac{\Delta m^2}{4E} \sin 2\theta & \frac{\Delta m^2}{4E} \cos 2\theta \end{bmatrix}$$

The extra term arises because ν_e have an extra interaction via W exchange with electrons in the Sun or Earth.

In the oscillation formula:

$$\sin^2 2\theta_m = \frac{\sin^2 2\theta}{(\omega - \cos 2\theta)^2 + \sin^2 2\theta}$$

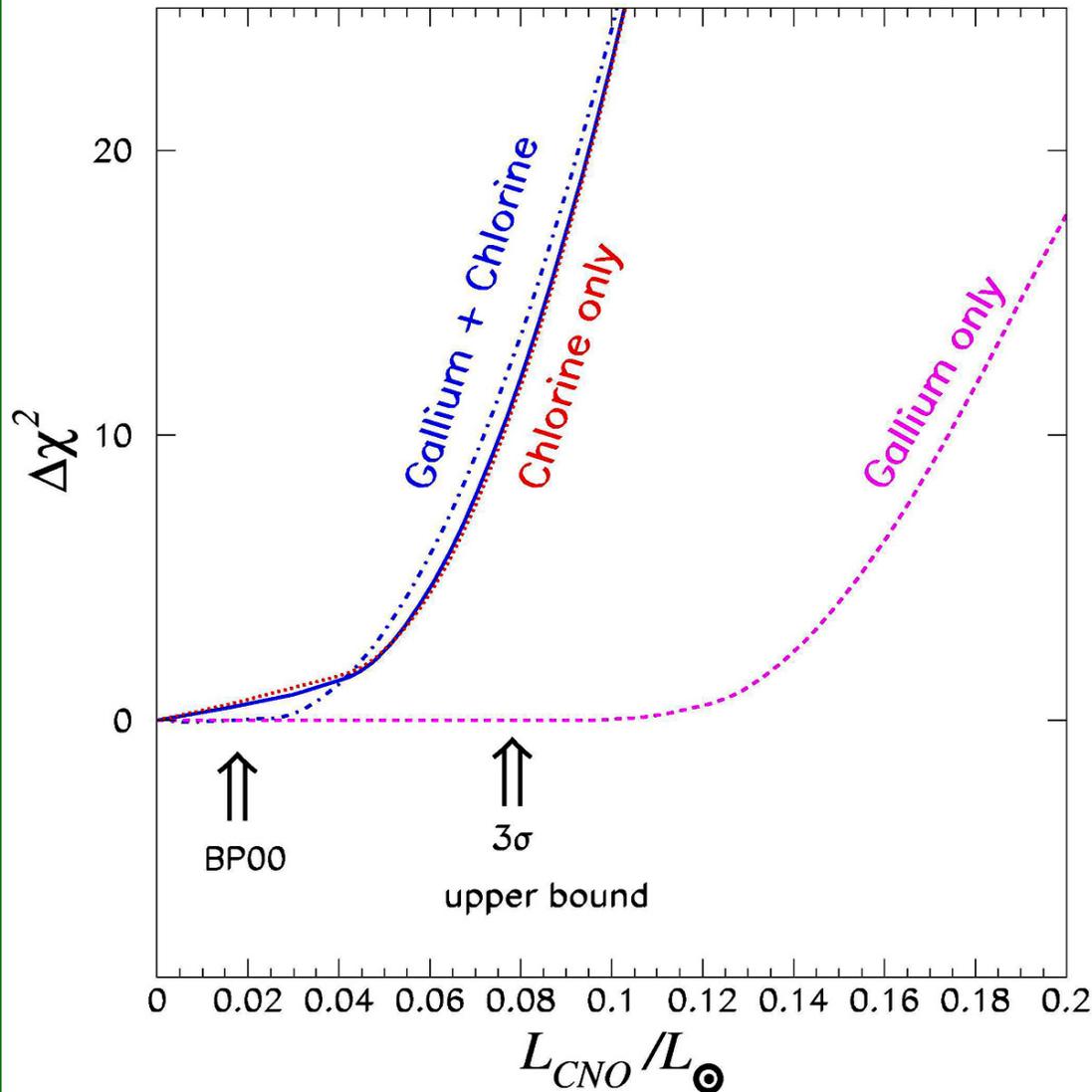
$$\omega = -\sqrt{2} G_F N_e E / \Delta m^2$$

MSW effect can produce an energy spectrum distortion and flavor regeneration in Earth giving a Day-night effect

Систематические эффекты и их неопределенности

Значения для эффективностей
извлечения и счета получены
для скорости захвата **65.4 SNU**

Origin of uncertainty	Uncertainty	
	in percent	in SNU
Extraction efficiency		
Ge carrier mass	±2.1%	±1.4
Mass of extracted Ge	±2.5%	±1.6
Residual Ge carrier	±0.8%	±0.5
Ga mass	±0.3%	±0.2
Total (extraction)	±3.4%	±2.2
Counting efficiency		
Volume efficiency	±1.0%	±0.7
End losses	±0.5%	±0.3
Monte Carlo interpolation	±0.3%	±0.2
Shifts of gain	-1.1%	+0.7
Resolution	+0.5%, -0.7%	-0.3, +0.5
Rise time limits	±1.0%	±0.7
Lead and exposure times	±0.8%	±0.5
Total (counting)	+1.8%, -2.1%	-1.2, +1.4
Nonsolar neutrino production of ⁷¹Ge		
Fast neutrons		< -0.02
²³² Th		< -0.04
²²⁶ Ra		< -0.7
Cosmic-ray muons		< -0.7
Total (nonsolar)		< -1.0
Background events that mimic ⁷¹Ge		
Internal ²²² Rn		< -0.2
External ²²² Rn		0.0
Internal ⁶⁹ Ge		< -0.6
Total (background events)		< -0.6
Energy weighting in analysis		±0.1
Total		-2.8, +2.6

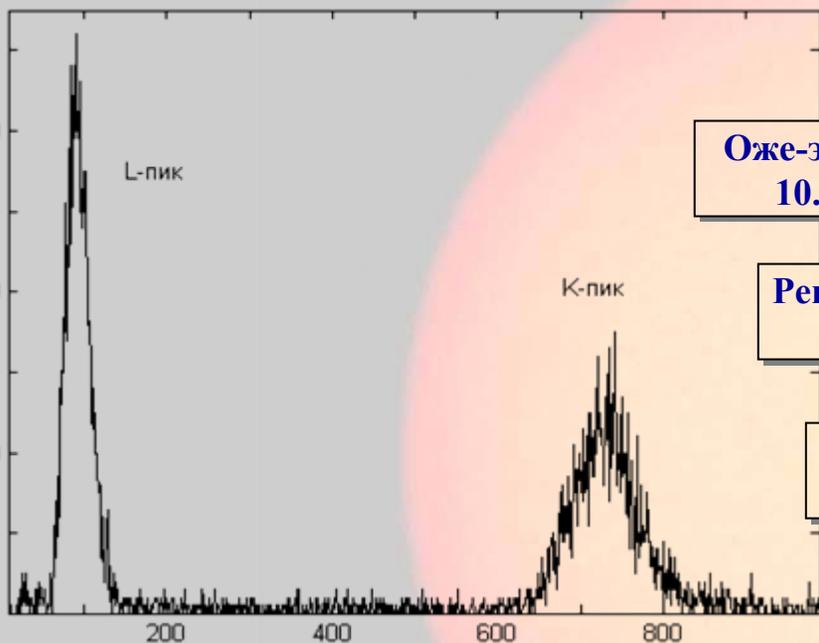


The relative role of the gallium and the chlorine experiment in establishing the experimental limit on the CNO luminosity from the Sun.

John N. Bahcall
Carlos Peña-Garay

Счет германия – 71. Пропорциональные счетчики.

$^{71}\text{Ge}(e^-, \nu_e)^{71}\text{Ga}$ $T_{1/2} = 11.43$ сут.



Спектр ^{71}Ge в пропорциональном счетчике.

L и K пики ~ по 30%.

Размеры и внутренние объемы счетчика:
длина катода – 5 см, внутренний \varnothing катода – 0.4 см,
 \varnothing вольфрамовой анодной нити – 10 – 12 мкм,
газовый объем – 0.6 – 0.7 см³.

Калибровка:

^{55}Fe (5.9 кэВ) и $^{109}\text{Cd-Se}$ (1.4 и 11.2 кэВ)

